



Paisaje agrícola en la provincia de Chimborazo



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

SUELOS DEL ECUADOR CLASIFICACIÓN, USO Y MANEJO.

Editores:
José Espinosa
Julio Moreno
Gustavo Bernal

2022

SUELOS DEL ECUADOR

CLASIFICACIÓN, USO Y MANEJO

Editores

José Espinosa, Consultor: jepinosa@fragaria.com.ec

Julio Moreno, Instituto Geográfico Militar: vjmi76.jm@gmail.com

Gustavo Bernal, Consultor: gusrbg@yahoo.com



**INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR**

2022

Catalogación en publicación IGM. Gestión Geográfica

Nombres: Espinosa Marroquín, José Antonio Elías, editor / Moreno Izquierdo, Víctor Julio, editor / Bernal Gómez, Gustavo Ramón, editor /

Título: Suelos del Ecuador: Clasificación, Uso y Manejo. José Espinosa, Julio Moreno, Gustavo Bernal (editores).

Descripción: Primera edición. / Quito: Instituto Geográfico Militar, 2022.

Identificación: ISBN 978-9942-22-557-3

Temas: Visión General de los Suelos de Ecuador / Suelos de la Costa / Suelos de la Sierra / Suelos del Oriente / Suelos de las Islas Galápagos / Uso del Suelo en Ecuador / Erosión del Suelo en Ecuador / Características de los Suelos en Ecuador y su Manejo / Microorganismos Benéficos en Suelos de Ecosistemas Naturales y Agroecosistemas del Ecuador.

Clasificación: Sector Público Gubernamental (978-9942-22)

La presente obra fue posible gracias al auspicio del Instituto Geográfico Militar (IGM). El libro es el resultado de la información generada, entre los años 2009 y 2017, por diversos proyectos de inversión que el Estado ecuatoriano estimó eran prioritarios, como, por ejemplo, los proyectos “Generación de Geoinformación para la Gestión y Valoración de Tierras de la Cuenca Baja del Río Guayas” y “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional”, los cuales se trabajaron a escala semidetallada.

Primera edición: 11 de abril, 2022.

©Instituto Geográfico Militar (IGM)

Av. Seniergues E4-676 y Gral. Telmo Paz y Miño, El Dorado.

Quito-Ecuador

ISBN 978-9942-22-557-3

Diseño de portada y Diagramación: Danny Lincango

Impresión: IGM

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

La versión digital está disponible gratuitamente en el Geoportal del IGM:

<https://www.geoportalmgm.gob.ec/portal/index.php/estudios-geograficos/>

Como citar este libro:

Espinosa, J., J. Moreno y G. Bernal (eds). 2022. Suelos del Ecuador: Clasificación, Uso y Manejo. Instituto Geográfico Militar (IGM). Quito, Ecuador.

Como citar capítulos de este libro (ejemplo capítulo 4):

Sánchez, D., J. Merlo, R. Haro, M. Acosta y G. Bernal. 2022. Suelos del Oriente. En: J. Espinosa, J. Moreno y G. Bernal (eds). Suelos del Ecuador. Instituto Geográfico Militar (IGM). Quito, Ecuador.

Prólogo

El levantamiento de los Andes, en épocas geológicas pasadas, modificó radicalmente el relieve y el clima de la sección occidental de América del Sur y permitió que Ecuador, un país relativamente pequeño, desarrolle una variedad de suelos que soportan una de las expresiones más amplias de biodiversidad en el mundo. A pesar de su importancia y diversidad, el suelo es quizá uno de los recursos naturales menos conocido en el país. A través de los años se han publicado mapas de suelos a diferentes escalas con sus respectivas memorias explicativas, pero esta información ha permanecido recluida en instituciones o en manos de pocos individuos y no ha estado disponible para el público en general.

Al momento, el país cuenta con suficiente información que se puede utilizar para describir las fascinantes características de los suelos de Ecuador, especialmente la información generada, entre los años 2009 y 2017, por diversos proyectos de inversión que el Estado ecuatoriano estimó eran prioritarios. Ejemplo de éstos son el proyecto “Generación de Geoinformación para la Gestión y Valoración de Tierras de la Cuenca Baja del Río Guayas” y el proyecto “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional”, los cuales se trabajaron a semidetalle (1: 25 000) y fueron conducidos por el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP) y la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES).

A partir del año 2019, el Instituto Geográfico Militar (IGM) adquirió las competencias del IEE-CLIRSEN y pasó a administrar y publicar esta información en su Geoportal. Estos proyectos se basaron en los estudios en cartografía de suelos realizados a escalas más pequeñas, entre los años 1970 y 1980, por el Programa Nacional de Regionalización (PRONAREG) y la ORSTOM (al momento IRD); mapas que fueron digitalizados y georreferenciados por el CLIRSEN, el MAGAP y el Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura (IICA) en el año 2002. Esta información, de fácil acceso, que está localizada en bibliotecas y plataformas digitales de diferentes instituciones nacionales, ha sido el insumo principal para escribir el libro “Suelos del Ecuador, Clasificación, Uso y Manejo”, que es una versión ampliada en español del libro "Soils of Ecuador", publicado en inglés por Springer en el año 2018.

En este libro se presenta la historia de la investigación, el clima, la geología, la geomorfología, los principales tipos de suelo, las propiedades, clasificación, uso y manejo de los suelos en Ecuador. Los primeros 5 capítulos del libro están organizados para representar los siguientes conceptos: 1) Paisajes, como sistemas geográficos naturales integrados y concebidos como zonas complejas resultado del arreglo estructural de los relieves relacionados por proximidad y complejidad y caracterizados, hasta cierto punto, por su comportamiento morfogenético y pedogenético; 2) regiones, como una integración de paisajes definidos por las siguientes reglas estrictas: a) suficientemente amplias, b) características físicas originales de cualquier naturaleza claramente definidas, y c) condiciones físicas y geográficas fácilmente diferenciables de los paisajes que lo rodean y; 3) ambientes naturales, como la integración de regiones basándose en la realidad física del país y la percepción de ellos por la población ecuatoriana. Los capítulos 6, 7 y 8 discuten extensamente las condiciones de uso y manejo de los suelos de Ecuador y, finalmente, el capítulo 9 hace una somera recopilación de la información sobre los microorganismos benéficos en los suelos del país.

Por otro lado, una de las competencias adquiridas por el IGM del IEE-CLIRSEN es la de construir el inventario de recursos naturales del país a través de la gestión de geoinformación temática orientada a la defensa, apoyo al desarrollo e inventario de recursos naturales, dentro de los cuales se encuentra el recurso suelo que sustenta la seguridad y soberanía alimentaria y es el soporte de las diversas actividades agro-productivas del país. Por esta razón, el IGM auspicia la publicación de este libro en su versión electrónica de libre acceso en su Geoportal y la impresión de

un número limitado de versiones en físico para la entrega a bibliotecas de instituciones públicas y privadas del país.

Finalmente, la escritura de este libro se hizo posible gracias a la colaboración de profesionales de diversas instituciones y profesionales en libre ejercicio, en una iniciativa que generó una detallada descripción de los suelos de este pequeño, pero altamente diverso país localizado en el centro del mundo.

Los editores

Contenido

1	Visión General de los Suelos de Ecuador	7
	Julio Moreno, Gustavo Bernal y José Espinosa	
2	Suelos de la Costa	45
	Julio Moreno, Gustavo Sevillano, Omar Valverde, Verónica Loayza, Renato Haro, Johanna Zambrano y David Reyes	
3	Suelos de la Sierra	105
	Julio Moreno, Fausto Yerovi, Mireya Herrera, Darwin Yáñez, José Espinosa y Renato Haro	
4	Suelos del Oriente	157
	Darwin Sánchez, José Merlo, Renato Haro, Mayra Acosta y Gustavo Bernal	
5	Suelos de las Islas Galápagos	189
	Lorena Lasso y José Espinosa	
6	Uso del Suelo en Ecuador	209
	Darwin Sánchez, Julio Moreno y José Espinosa	
7	Erosión del Suelo en Ecuador	241
	José Espinosa, Renato Haro, Julio Moreno, Freddy Amores y Óscar Ayala	
8	Características de los Suelos en Ecuador y su Manejo	323
	José Espinosa, Francisco Mite, Soraya Alvarado y Julio Moreno	
9	Microorganismos Benéficos en Suelos de Ecosistemas Naturales y Agroecosistemas del Ecuador	385
	María Eugenia Ávila, Narcisa Urgiles, Paúl Loján y Salomé Araujo	

CAPÍTULO 1

— VISIÓN GENERAL —

DE LOS SUELOS DEL ECUADOR

Julio Moreno, Instituto Geográfico Militar: vjmi76.jm@gmail.com

Gustavo Bernal, Consultor: gusrbg@yahoo.com

José Espinosa, Consultor: jepinosa@fragaria.com.ec

RESUMEN

La Cordillera de Los Andes divide al Ecuador continental en tres regiones diferentes: Costa, Sierra y Amazonía, y cada una ellas constituye un complejo y variado sistema de climas, suelos, biodiversidad y paisajes, producto de la conjunción del carácter ecuatorial de la zona y la altitud. Estas condiciones hacen que la insolación no sea uniforme en todo el territorio y que se provoquen vientos anárquicos y regímenes pluviales distintos que controlaron el desarrollo de los suelos. La región Insular está formada por islas que emergen del Océano Pacífico por las erupciones sucesivas de los volcanes submarinos y son las que formaron paisajes que desarrollan condiciones también influenciadas por la altitud. La Costa es una región potencialmente muy rica debido a la existencia de una llanura de suelos fértiles, aun cuando las fuertes pendientes de la cordillera costera limitan la actividad agrícola y la zona muy húmeda del norte tiene suelos ferralíticos de baja fertilidad. La Sierra es la zona demarcada por las cordilleras que va desde los 1 300 hasta 3 800 m s. n. m., siendo las pendientes el principal factor limitante para la agricultura en esta región. La parte norte de la Sierra es más rica debido a los aportes de cenizas volcánicas. El centro y sur de la sierra no tuvieron aportes volcánicos recientes, pero debido al efecto del clima y del material parental tienen una variedad de suelos, pero en muchos sectores se observa la presencia de suelos pobres con propiedades ferralíticas. En la Amazonía, los suelos aluviales y aquellos derivados de cenizas volcánicas cercanos a la cordillera son los únicos con limitantes poco importantes para la actividad agrícola; los demás son suelos aluviales con problemas de hidromorfía o ferralíticos que forman una región particularmente frágil, con serias limitaciones serias para la agricultura, en la que se debe solamente conservar el bosque y todos sus servicios ambientales. En las islas Galápagos, debido a la aridez del clima, los suelos son esencialmente minerales, excepto en los flancos húmedos de los volcanes donde las proyecciones volcánicas han podido alterarse dando lugar a Andisoles, mientras que las lavas han dado lugar a suelos ferralíticos poco evolucionados.

ABSTRACT

The Andes divides Ecuador in three natural regions: Coastal Plane, Highlands, and Amazonia, each one a complex and varied system of climate, landscapes, soils, and biodiversity product of the equatorial conditions of the country and the altitude. For these reasons, sunshine is not uniform in all areas of the country promoting the presence of anarchic winds and distinct pluvial regimes that controlled soil development. The Galapagos Islands are also included in the national territory. These islands emerged from the Pacific Ocean due to the eruption of submarine volcanos developing landscapes, also influenced by climate and altitude. The Coastal Plane has an extended plain of high fertility soils but step slopes around the central coastal cordillera limit agricultural production and the humid section of the north have poor ferralitic soils. The highlands, demarcated by the two cordilleras, comprise a zone from 1 300 to 3 800 m a.s.l. This region has the steep slopes as the main limiting factor for agriculture. The northern section of the Highlands has richer soils due to volcanic ash contribution. The center and southern sections of the Highlands do not have volcanic ash cover from volcano activity, but climate and parental materials have promoted the development of a variety of soils, but there are many areas dominated by poor fersalitic soils. In the Amazonia region, the areas close to the cordillera have alluvial or volcanic ash-derived soils which can be used for agriculture if slope is not limiting. The rest of the Amazonia has alluvial hydromorphic or poor ferralitic soils forming a particularly fragile area with severe limitations for agriculture. Forest and all environmental services of this zone must be conserved. The Galapagos Islands has mineral soils due to the arid climate, except for the humid volcano flanks where the alteration of pyroclastic materials has developed Andisols, while the lava accumulation has given place to fersalitic poorly evolved soils. Only a small section of the Galapagos Islands is used for agricultural activities due to restriction to protect the national park.

1.1. Historia de los Levantamientos de Suelos en el Ecuador

Los primeros estudios de los suelos de Ecuador fueron las descripciones de la Costa y de la Sierra realizadas por Hugh H. Bennett en 1922. Estos estudios no publicados llegaron a las manos de Misael Acosta Solís quien los amplió para publicar el primer mapa de suelos de la Costa y Sierra del país (Acosta Solís, 1965; Pacheco, 2009).

Misael Acosta Solís, entre los años de 1940 y 1952, realizó estudios orientados a la geobotánica en varias provincias, es decir, estudios de las tierras en relación con la vegetación nativa para definir un grupo de plantas indicadoras de cada grupo edáfico, pero no todos estos estudios se publicaron. Acompañó, además, varias excursiones realizadas por científicos norteamericanos por las tres regiones naturales del Ecuador. De estos estudios, los de mayor relevancia fueron los trabajos realizados por Robert L. Pendleton y Charles S. Simmons, los mismos que fueron complementados por Miller y que sirvieron para clasificar la mayor parte de los suelos ecuatorianos dentro de los grandes grupos internacionalmente reconocidos y para crear nuevos nombres, especialmente para aquellos de los páramos. La compilación de todos estos estudios se evidenció en la publicación de Miller en 1945 a través de un mapa de los principales grupos zonales de suelos de Ecuador (Acosta Solís, 1965; Pacheco, 2009; Ortiz, *et al.*, 2010), material que luego lo publicó en 1959 en la revista *Geographical Review* (Miller, 1959) en un artículo titulado *Agricultural Ecuador* y cuyos mapas de materiales parentales y clasificación de suelos se presentan en la **Figura 1.1**.

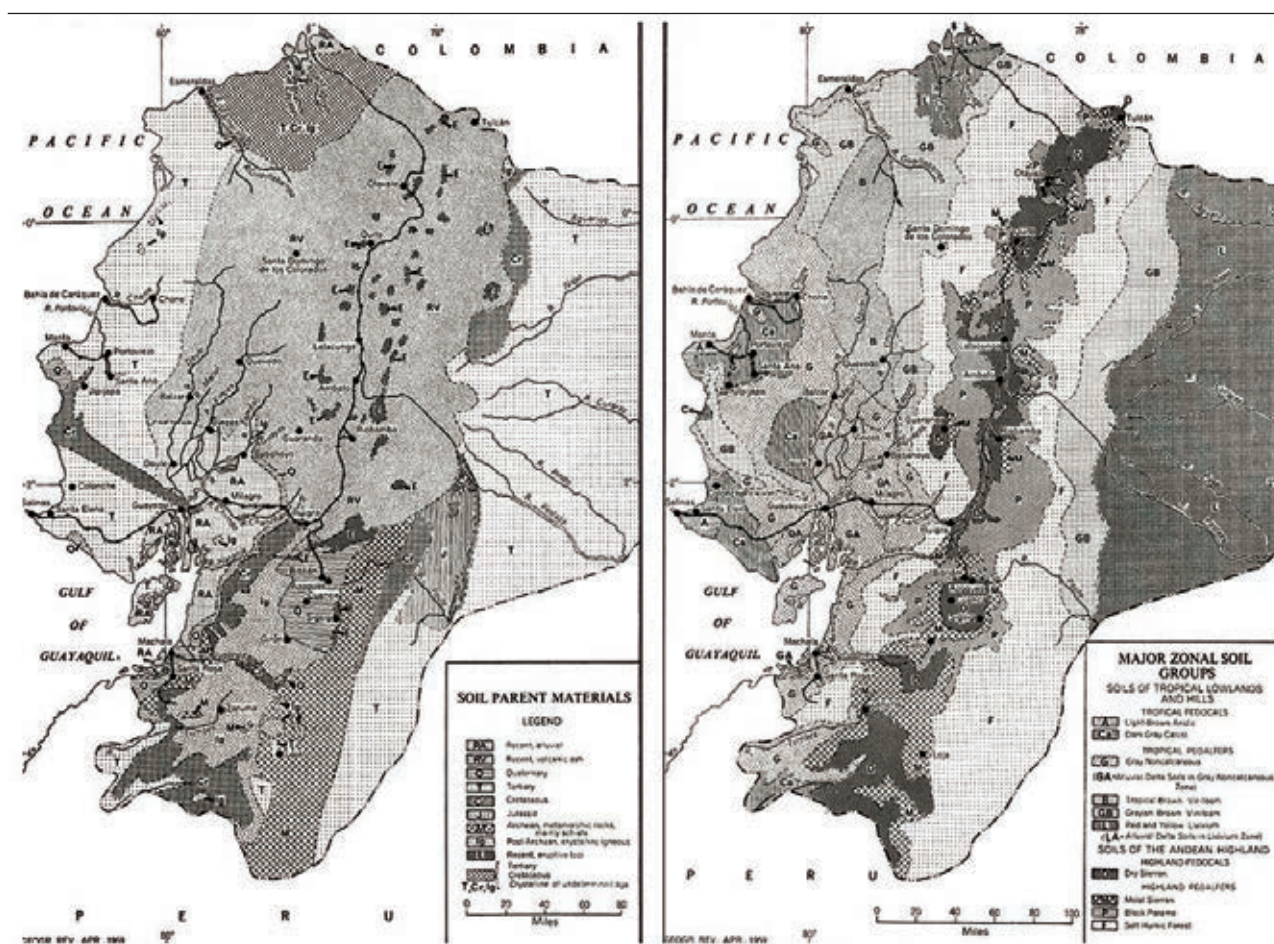


Figura 1.1. Mapas de material parental y clasificación de suelos de Ecuador publicado por Miller en 1959 en la revista *Geographical Review* (Miller, 1959).

En el año 1955 se firmó un acuerdo de asistencia técnica entre la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el gobierno del Ecuador para iniciar los estudios de levantamiento

y clasificación de suelos del país. Con el apoyo de Erwin Frei, consultor de la FAO, quien trabajó en el país durante los años 1955 y 1956, se realizaron estudios a nivel exploratorio en casi todo el territorio nacional para elaborar el primer inventario y determinar la distribución geográfica de los suelos. Estos estudios permitieron ubicar la existencia de 18 distintas grandes asociaciones de suelos en Ecuador que se plasmaron en el mapa emitido por la FAO y que Frei lo publicó en la revista *Plant and Soil* en 1958 (Figura 1.2). Frei fue remplazado por Alfredo Küpper, quien continuó con el plan nacional de estudio y clasificación de los suelos ecuatorianos (Acosta Solís, 1965). La información recopilada se cartografió en el mapa de suelos del Ecuador, a escala 1: 1 000 000, único documento disponible hasta aquella fecha y que luego sirvió como base para realizar el bosquejo general edafológico del país reducido a escala 1: 2 000 000 (CLIRSEN, 1979).

En la década de 1960 se realizaron estudios de suelos muy puntuales. Uno de ellos es el Estudio Preliminar sobre Ecología, Suelos y Posibilidades Agropecuarias de la Región Oriental del Ecuador realizado por Rafael Pacheco, quien presenta un mapa a escala 1: 500 000 con seis grandes asociaciones de suelos con los nombres, ubicación y demarcación de cada una de ellas. Otro estudio de suelos fue realizado para el Centro de Reconversión del Azuay, Cañar y Morona Santiago (CREA) por Alfredo Küpper, Rafael Pacheco y Víctor Andrade: el informe y el mapa a escala 1: 500 000 presentados reconocen la presencia de 6 grandes grupos de suelos, dos asociaciones y una transición en el territorio de esas provincias (Acosta Solís, 1965).

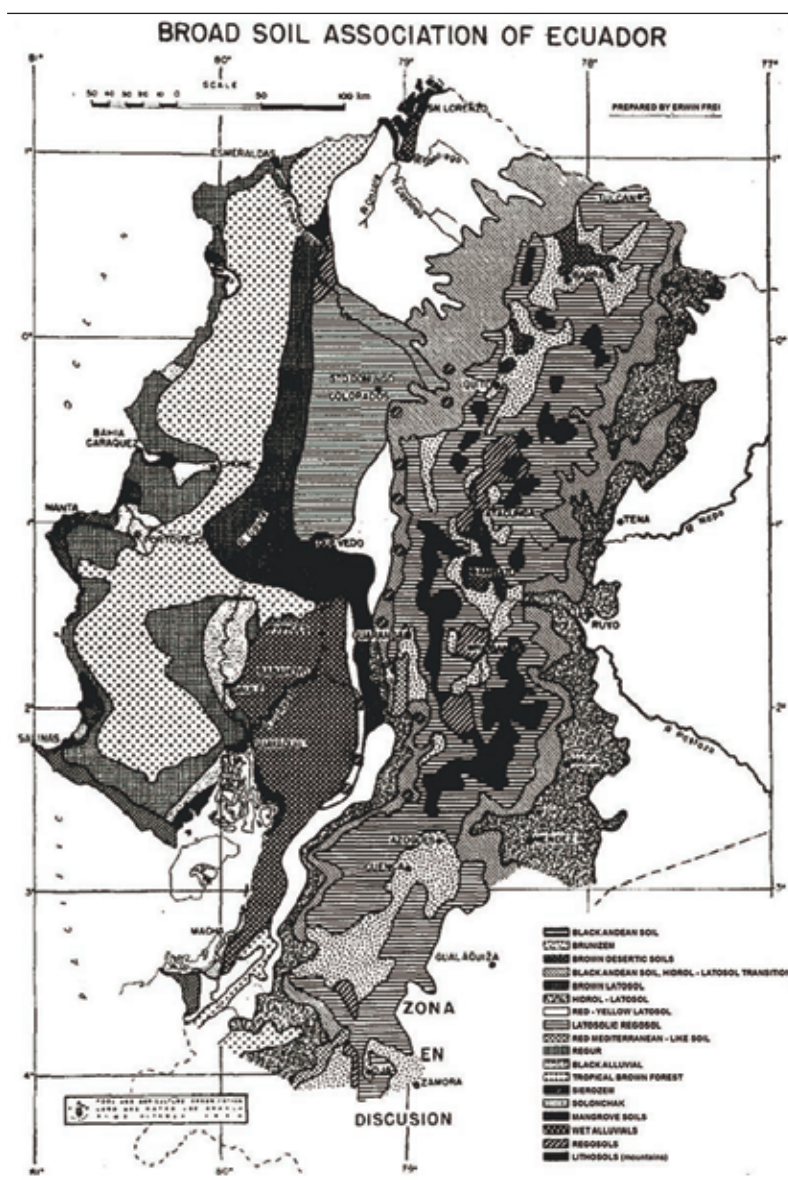


Figura 1.2. Primer mapa de suelos detallando las grandes asociaciones de suelos de Ecuador (Frei, 1958).

El Ecuador, en la década de los 70's, sufrió un cambio radical con el descubrimiento y explotación de petróleo en vastos territorios de la Amazonía u Oriente, como se conoce a esta región del país. Esta situación generó una ingente cantidad de recursos monetarios que, en buena forma, y bajo el slogan de "sembrar el petróleo", le permitió al gobierno nacional dar un gran impulso a las actividades económicas del país, especialmente al sector agropecuario. De esta forma, y con gran visión, se apoyó la ejecución del Mapa Agrícola Nacional. La implementación de los estudios y la elaboración del mapa estuvieron a cargo del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

EL MAG, con la finalidad de dar la suficiente consistencia técnica a la planificación agrícola ecuatoriana, implementó el Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG), el mismo que sería el encargado del estudio y evaluación de los recursos renovables y de las investigaciones agro-socioeconómicas del país. Estructuralmente, el PRONAREG contó con profesionales del MAG y, mediante Acuerdo Ministerial, convocó a profesionales ingenieros agrónomos especialistas en suelos, clima y geología de varias instituciones públicas, entre las cuales se pueden citar al Instituto de Recursos Hidráulicos (INERHI), Instituto Ecuatoriano de Reforma Agraria y Colonización (IERAC), Centro de Rehabilitación de Manabí (CRM), Comisión de Estudios para la Cuenca del Río Guayas (CEDEGE), Proyecto de Desarrollo del Sur (PREDESUR), entidades que de manera individual venían realizando estudios de suelos específicos y puntuales, principalmente con fines de riego.

La primera iniciativa de PRONAREG fue la organización y realización del primer curso nacional de normas, metodologías y procedimientos como herramienta básica para efectuar levantamientos edafológicos a nivel nacional (González, *et al.*, 1986). Formaron parte de este grupo pionero de edafólogos el Dr. Fausto Maldonado y los ingenieros Jacinto Yépez, Néstor Espinosa, Gustavo Peña, Carlos Luzuriaga, Héctor Loor, Patricio Toledo, Augusto González y Richard Guillen.

Asimismo, PRONAREG suscribió un convenio de asesoramiento y cooperación técnica con la *Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer* (ORSTOM) de Francia. Este convenio fue suscrito en 1974, pero los primeros estudios se iniciaron en febrero de 1975, debido a que la ORSTOM necesitó primero coleccionar datos básicos que permitiesen el análisis completo del medio rural ecuatoriano (Portais, 1997). En los inicios de la actividad de la ORSTOM en Ecuador se puede mencionar la contribución, entre los más destacados, de los siguientes investigadores franceses: Françoise Colmet Daage, Michael Portais, Pierre Pourrut, Alain Winckel, Claude Zebrowski, George De Noni, Michael Sourdat (González, 2015).

El convenio PRONAREG-ORSTOM, durante el periodo comprendido entre 1976 y 1986, llevó a cabo 16 proyectos de levantamiento de suelos en Ecuador, generando mapas morfopedológicos de la región Amazónica (escala 1: 500 000), región Costa (escala 1: 200 000) e islas Galápagos (escala 1: 50 000), así como mapas de suelos de la región Sierra a escala 1: 50 000 y 1: 200 000 (IRD, 2019). A pesar de que los trabajos básicos se hicieron a varias escalas, éstos finalmente se presentaron en las escalas indicadas anteriormente (Portais, 1997). La clasificación taxonómica se generalizó a nivel de Gran Grupo y en algunos casos de Subgrupo, utilizando el sistema norteamericano de clasificación prevalente en esa época (Soil Survey Staff, 1975). Como herramienta complementaria para la descripción de perfiles se usó la Guía de Descripción de Perfiles de Suelos de la FAO (Mejía, 1997; Ortiz, *et al.*, 2010). Estos estudios edafológicos no solo se basaron en los levantamientos de suelos, sino también en estudios de geomorfología apoyados en fotointerpretación y en análisis de laboratorio para cuantificar los parámetros físicos, químicos y mineralógicos de los suelos, análisis que se condujeron en laboratorios de Ecuador, las Antillas y Francia (Ortiz, *et al.*, 2010).

Las fichas de descripción de perfiles y reportes de los análisis de laboratorio del convenio PRONAREG-ORSTOM incluyen 19 atributos físico-químicos del suelo, 4 atributos geomorfológicos y 2 atributos climáticos. En estas fichas se incluyó información sobre el lugar (región), altitud, paisaje, pendiente, precipitación, temperatura atmosférica, drenaje externo e interno, profundidad de los

horizontes, color, presencia de moteados, textura, estructura, régimen de humedad del suelo, régimen de temperatura del suelo, macro nutrientes, cationes intercambiables, pH (H_2O y KCl), porcentaje de partículas, reacción al NaF y carbonatos, relación carbono/nitrógeno (C/N), contenido de ácidos húmicos y fúlvicos, densidad aparente y contenido de agua disponible (Ortiz, *et al.*, 2010).

Durante este periodo también se realizaron otros estudios de suelos a nivel de semidetalle y detalle. Dentro de los primeros se generaron 37 proyectos, en los cuales se incluye la cartografía de suelos y pendientes de la región de la Sierra a escala 1: 50 000, generada por el grupo PRONAREG-ORSTOM. A nivel detallado se levantaron 18 proyectos a cargo de instituciones como el INHERI, CRM, CEDEGE y en menor proporción por el PRONAREG (CLIRSEN, 1979; Mejía, 1997).

En el año 1974 se compilaron estudios de suelos de América del Sur, incluyendo Ecuador. Este trabajo agrupa los suelos en secciones de acuerdo con el manejo y discute los métodos para correlacionar los diferentes sistemas de clasificación para el uso de la tierra, limitaciones de fertilidad, manejo de acidez y fertilidad, así como un mecanismo para desarrollar una red de investigación de suelos tropicales (Bornemiza y Alvarado, 1974).

Varios levantamiento de suelos de carácter regional se realizaron en esa década. Cabe resaltar el estudio de reconocimiento general de los suelos de las provincias de Loja y El Oro, efectuados por el MAG en 1975, cubriendo una superficie de 13 767 km², con publicación a escala 1: 250 000, con unidades de mapeo en consociaciones y asociaciones de suelos. En 1977 PREDESUR condujo un estudio de suelos y su correspondiente interpretación agrológica como base para la implementación del proyecto binacional Puyango-Túmbez. El levantamiento cubrió 69 016 ha en áreas consideradas como prioritarias para Ecuador.

En esta época, instituciones como INERHI, CRM, CEDEGE y MAG condujeron también estudios de suelos a nivel de detalle para planificar el uso agrícola intensivo, desarrollo de proyectos específicos, establecimiento de granjas experimentales, avalúo catastral a nivel de finca, rentabilidad y productividad de la tierra, construcción de canales de distribución y necesidades globales de dotación de agua (González, 2015).

En 1984, Ecuador y Chile fueron sedes del Sexto Taller Internacional de Clasificación de Suelos. En este evento se definieron las propiedades ándicas que caracterizan los suelos derivados de cenizas volcánicas, propiedades que luego fueron documentadas por primera vez por el Comité Internacional para la Clasificación de los Andisoles (ICOMAND, por su siglas en inglés) y que sirvieron de base para que definir el nuevo orden de los Andisoles en las Claves para la Taxonomía de Suelos en 1990 (Soil Survey Staff, 1990; Parfitt and Clayden, 1991; Shoji, *et al.*, 1993; Takahashi and Shoji, 2002; Dahlgren, *et al.*, 2004). Antes de esa fecha, los suelos derivados de cenizas volcánicas estaban incluidos en el orden de los Inceptisoles como el suborden Andepts (Soil Survey Staff, 1975).

En el año de 1986, la Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo (SECS) publica, a escala 1: 1 000 000, el Mapa General de Suelos del Ecuador con base a la cartografía edafológica generada previamente por el convenio PRONAREG-ORSTOM: a escala 1: 200 000 para la Sierra y Costa, 1: 500 000 para la región Amazónica y 1: 50 000 para las islas Galápagos. En este mapa se identificaron 36 Grandes Grupos, agrupados en 18 Subórdenes y 8 Órdenes, según el sistema de clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (**Figura 1.3**) (González, *et al.*, 1986).

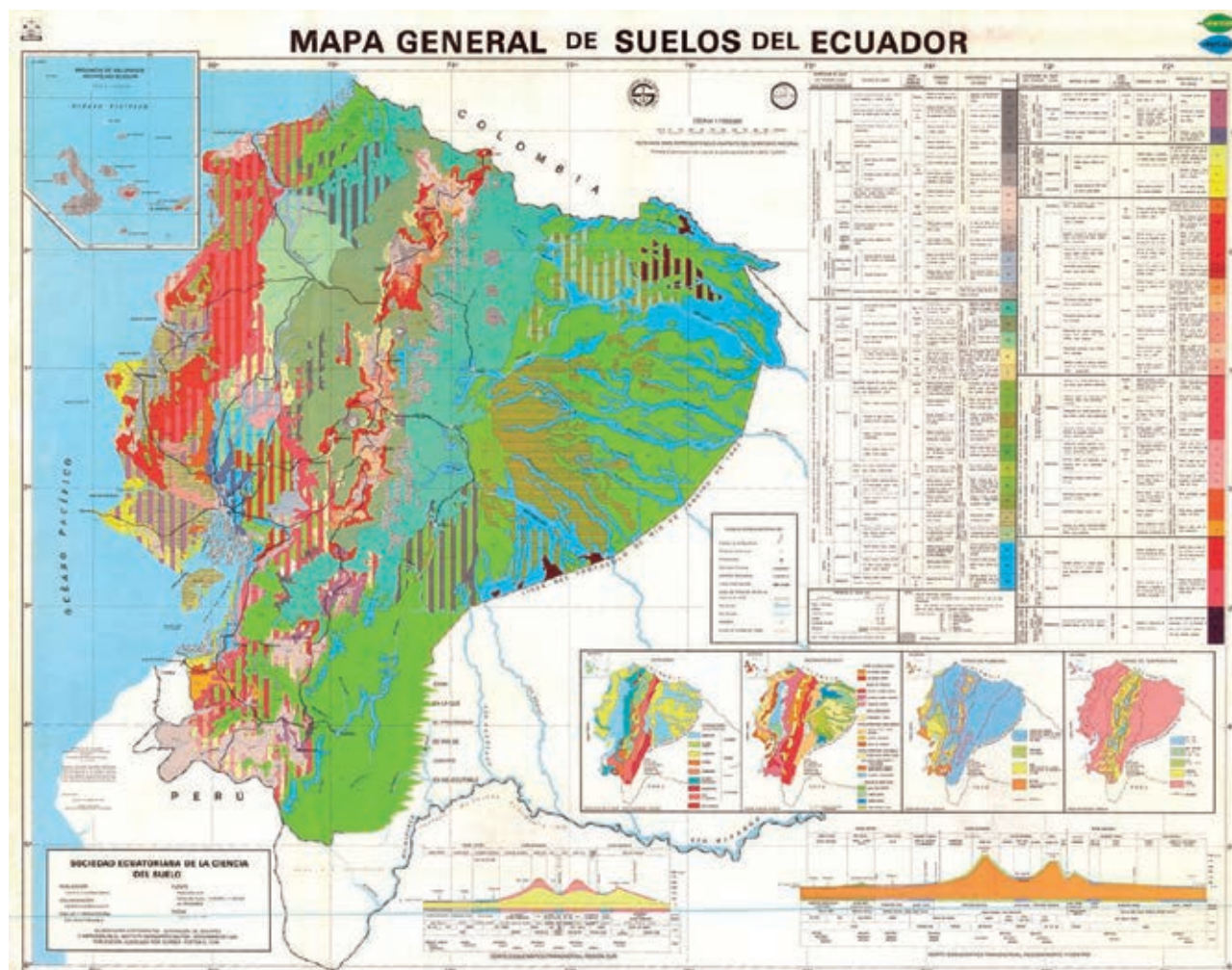


Figura 1.3. Mapa de suelos de Ecuador publicado por la Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo basándose en la información generada por el convenio PRONAREG-ORSTOM (González, *et al.*, 1986).

En el año de 1996 se celebró en Quito el III Simposio Internacional sobre “Suelos Volcánicos Endurecidos” que abordó la problemática de las cangahuas del Ecuador y Colombia y de los tepetates en México. Estos suelos están localizados en los piedemontes de los volcanes de regiones muy pobladas y han sido sometidos a constante erosión debido a prácticas de cultivo inapropiadas. Como producto de la severa pérdida de suelos por erosión afloraron capas de material endurecido de muy difícil manejo. El libro de las memorias del evento presenta los resultados de estudios sobre las características de los materiales endurecidos, los factores que condicionan su productividad, la erosión y las prácticas de conservación y las condiciones socioeconómicas de su rehabilitación para uso agrícola y agro-pastoril (Zebrowski, *et al.*, 1997).

En el año 1997 se elabora el Mapa General de Clasificación de Capacidad - Fertilidad de los Suelos del Ecuador (escala 1: 2 000 000), con base en los mismos estudios edafológicos del PRONAREG-ORSTOM y sobre el mapa general de suelos del Ecuador (1: 1 000 000) (Mejía, 1997). Este mapa, presentado en la **Figura 1.4**, permite interpretar las características de los suelos inventariados como orientación para que el especialista o usuario pueda realizar el diagnóstico preliminar de la fertilidad del suelo o zonificación agrícola, pecuaria, forestal y/o aspectos ambientales afines de una determinada localidad en Ecuador.

Como parte de este trabajo se realizó la actualización taxonómica del mapa general de suelos del Ecuador a escala 1: 1 000 000 publicado en el año 1986 por la Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo, utilizando como sistema de clasificación la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) (**Figura 1.5**).

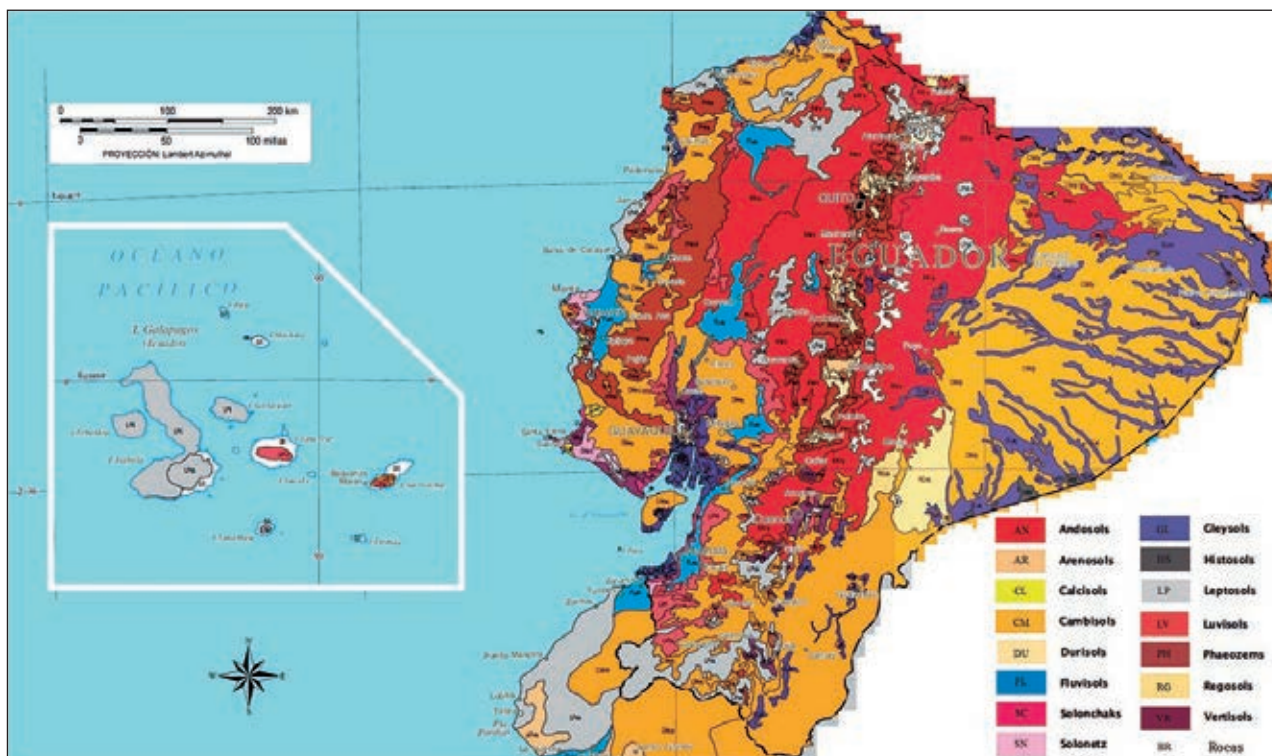


Figura 1.5. Mapa de suelos de Ecuador, publicado a escala 1: 3 000 000, con base al sistema de clasificación de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). Adaptado de Gardi, *et al.* (2014).

Desde el año 2009 al 2017 varias instituciones del Estado, como el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), transformado a Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) desde el año 2012 y absorbido por el Instituto Geográfico Militar (IGM) desde el 2019, conjuntamente con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), realizaron el levantamiento de, aproximadamente, 14 105 perfiles de suelo dentro de proyectos de inversión (IGM, 2019; MAG, 2019), con el objetivo de generar geoinformación del territorio nacional a escala 1: 25 000 (**Figuras 1.6 y 1.7**), como insumo para la gestión territorial, gestión de riesgo y mejoramiento y sostenibilidad de la producción agrícola; la misma que puede ser descargada a nivel cantonal de los siguientes sitios web:

https://www.geoportaligm.gob.ec/nextcloud/index.php/s/Perfiles_Suelos
<http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/>
<http://metadatos.sigtierras.gob.ec/zip/>
<http://metadatos.sigtierras.gob.ec/jpg/>
<http://geoportal.agricultura.gob.ec/>

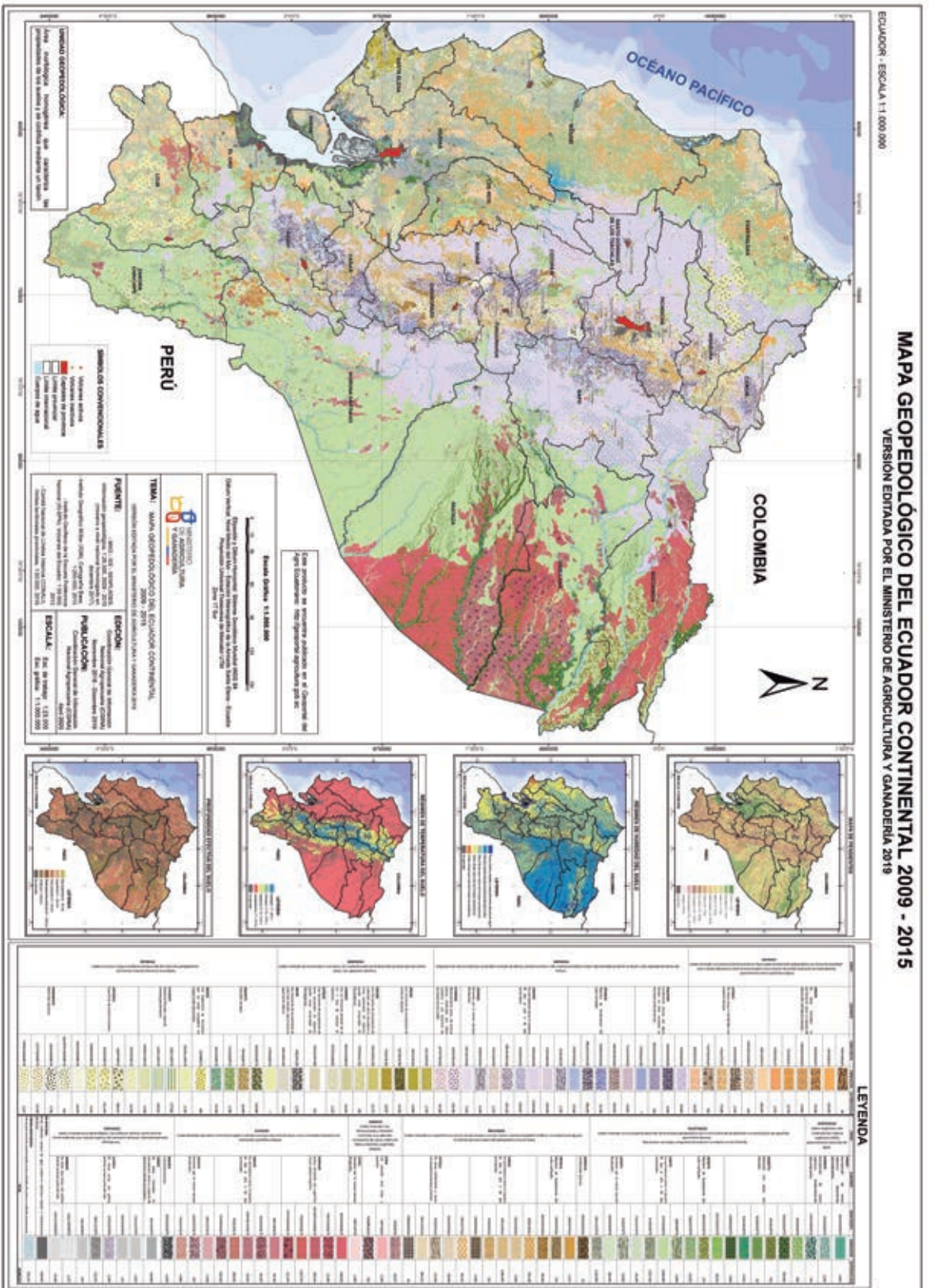


Figura 1.6. Mapa Geopedológico del Ecuador continental (versión editada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería en 2019), escala 1:25.000.
 Fuente: Geoportail del MAG (<https://bit.ly/3MfCDhw>)

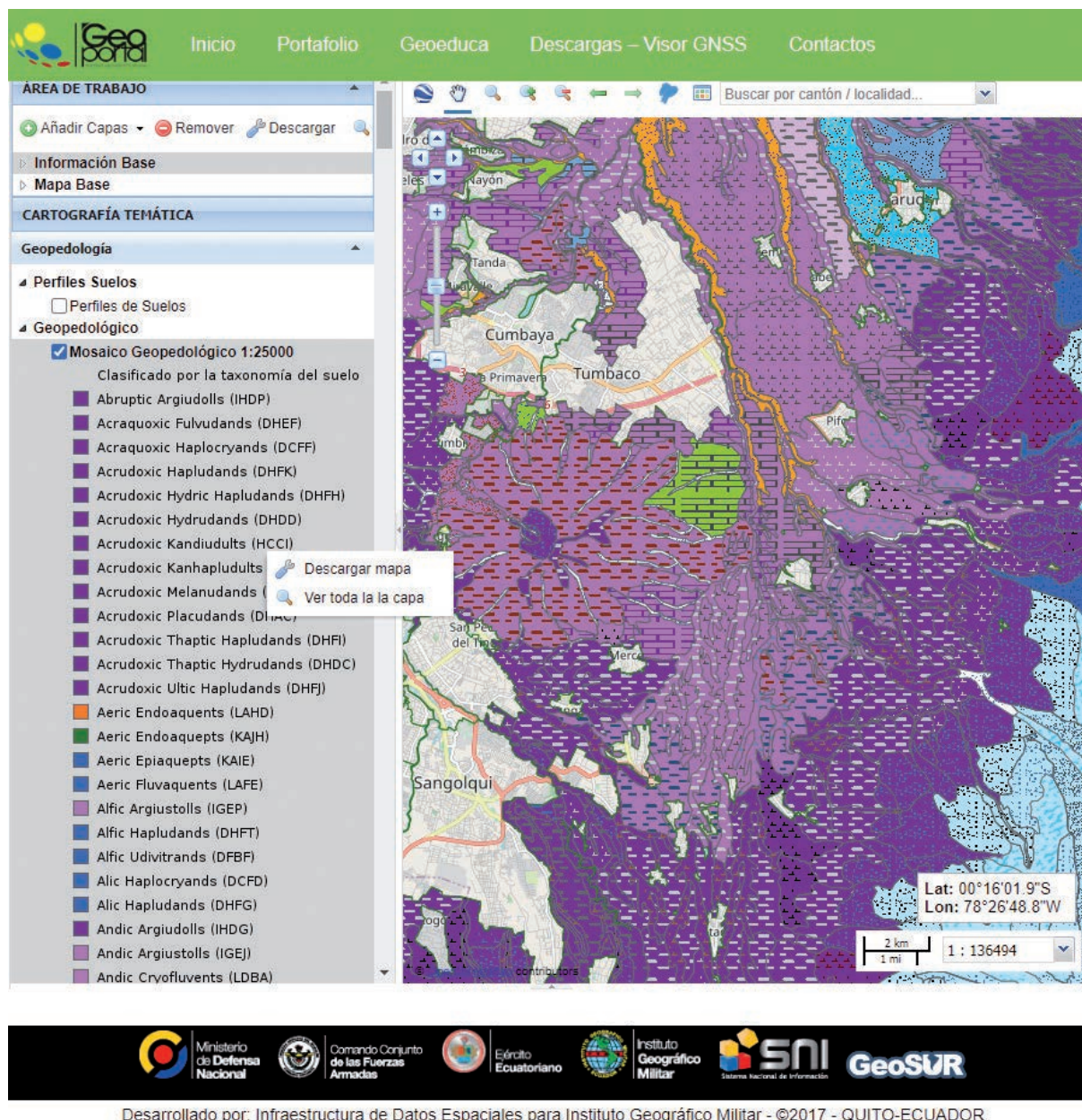


Figura 1.7. Vista del geoportal del IGM, en el visor geoinformación a nivel nacional, donde está publicada la cartografía digital de suelos del Ecuador continental a escala 1: 25 000 –lista para descargarse sin costo - (<https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/visualizador/>).

1.2. Aspectos Geográficos de la República del Ecuador

La República del Ecuador (continental e insular) se encuentra ubicada en el Hemisferio Occidental, al noroeste de América del Sur (**Figura 1.8**). El territorio continental está localizado entre las latitudes $01^{\circ} 28' N$ y $05^{\circ} 02' S$ y entre las longitudes $75^{\circ} 11' O$ y $81^{\circ} 04' O$. El territorio insular (Archipiélago de Colón o Galápagos) está ubicado al oeste del territorio continental, aproximadamente a 1 000 km de distancia, entre las latitudes $1^{\circ} 39' N$ y $1^{\circ} 26' S$ y entre las longitudes $89^{\circ} 15' O$ y $92^{\circ} 01' O$. Ecuador, con una extensión total de 256 370 km², limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico. La Línea Equinoccial, o paralelo 0° , atraviesa el país dividiéndolo en dos partes, territorio continental y territorio insular, pero la mayor parte del territorio se localiza en el Hemisferio Sur (IGM, 2013).

1.3. Regiones y Paisajes Naturales del Ecuador

La cordillera de Los Andes divide al Ecuador continental en tres regiones diferentes: Costa, Sierra y Amazonía, cada una ellas constituye un complejo y variado sistema de climas, suelos, biodiversidad y paisajes, producto de la conjunción del carácter ecuatorial de la zona y la altitud (nivel del mar hasta 6 310 m en la cima del volcán Chimborazo) (Figura 1.9).

Estas condiciones hacen que la insolación no sea uniforme en todo el territorio y que se provoquen vientos anárquicos y regímenes pluviales distintos.

La región Insular (Archipiélago de Galápagos) está formada por islas que emergen del Océano Pacífico por las erupciones sucesivas de los volcanes submarinos y son las que formaron paisajes que desarrollan condiciones también influenciadas por la altitud (Figura 1.10) (IGM, 2013).

La región Costa se extiende desde la línea costera (nivel del mar) hasta la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes a una altitud de 1 200 m s. n. m. La región Sierra está formada por las cordilleras Occidental y Oriental, dispuestas en dirección meridiana, con vertientes exteriores muy abruptas, que se caracterizan por una declinación general de altitudes y una masividad decreciente de norte a sur (IGM, 2013).

La región Amazónica se localiza a partir del pie de la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, pero entre los 500 y 1 500 m s. n. m. se encuentra una faja de 50 km de ancho que se asemeja a una tercera cordillera, luego, por debajo de la cota 300 m s. n. m., se extiende la llanura amazónica que llega hasta el límite con Perú al este. Esta llanura se caracteriza por presentar un paisaje monótono conformado por pequeñas colinas de alrededor de 50 m de altura.

Finalmente, la región Insular está integrada por 14 islas mayores ubicadas a una distancia entre 900 y 1 200 km del continente, constituidas por volcanes que emergen del mar con laderas suaves y cuyas calderas culminan a aproximadamente 1 600 m s. n. m. (IGM, 2013).



Figura 1.8. Ubicación geográfica del Ecuador (IGM, 2013).

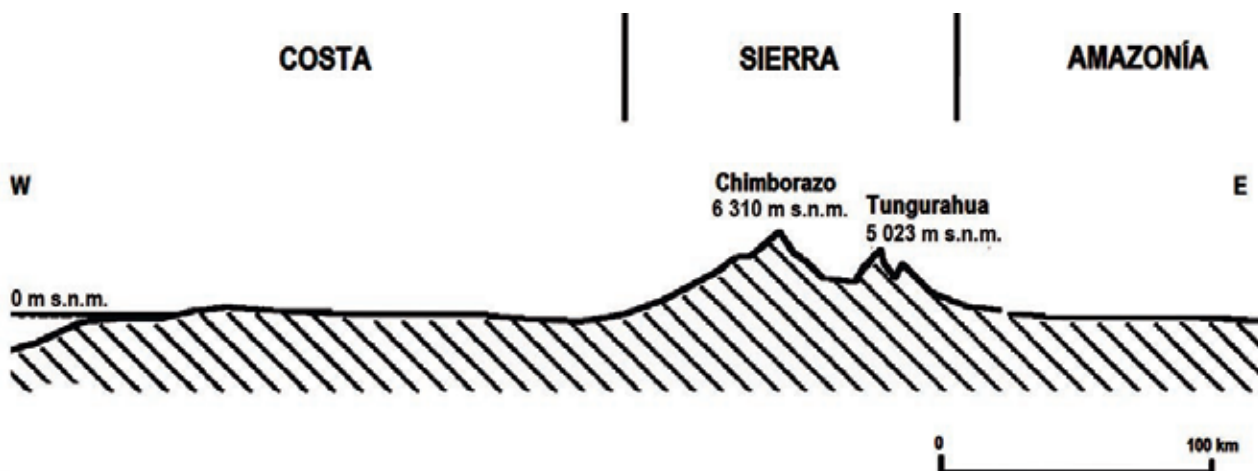


Figura 1.9. Corte esquemático de la topografía del Ecuador continental (Marocco y Winter, 1997).

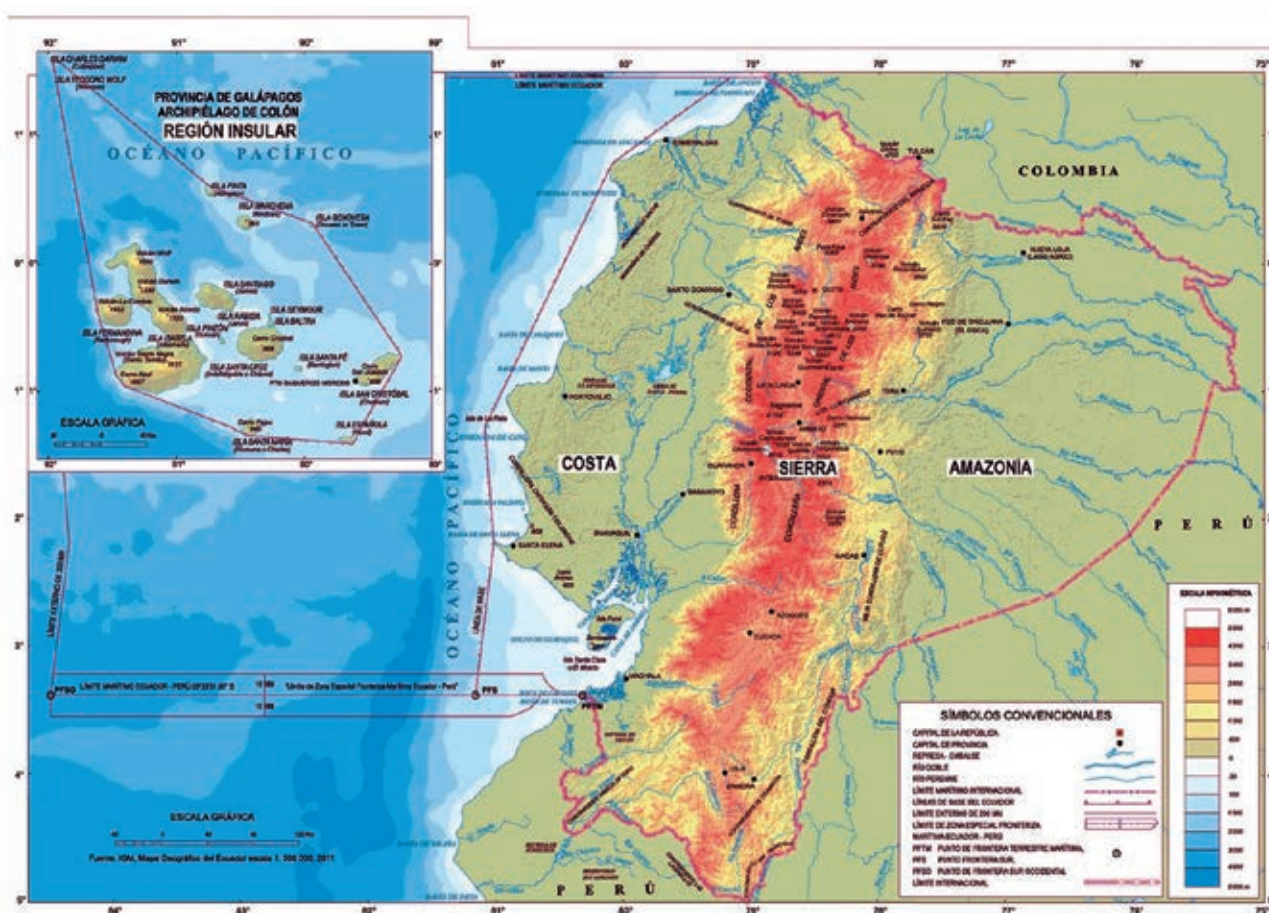


Figura 1.10. Relieve del Ecuador (IGM, 2013).

Dentro de cada una de estas regiones se pueden encontrar diferentes paisajes (Winckell, *et al.*, 1997b). Así, en la Sierra se destacan cuatro (Figura 1.11): a) vertientes y cordilleras andinas, b) cuencas interandinas de la Sierra Norte, con cobertura piroclástica, c) cuencas y valles interandinos de la Sierra Central, sin cobertura piroclástica, y d) relieves de la Sierra Meridional.

En la Costa se observan cuatro paisajes (Figura 1.12): a) regiones costeras noroccidentales, b) regiones costeras centrales de Manabí, c) península de Salinas y la Isla Puná, y d) llanura central y su piedemonte.

Los paisajes de la Amazonía son dos (Figura 1.13): a) relieves subandinos que corresponden al lado más próximo a los Andes y b) Amazonía Periandina.

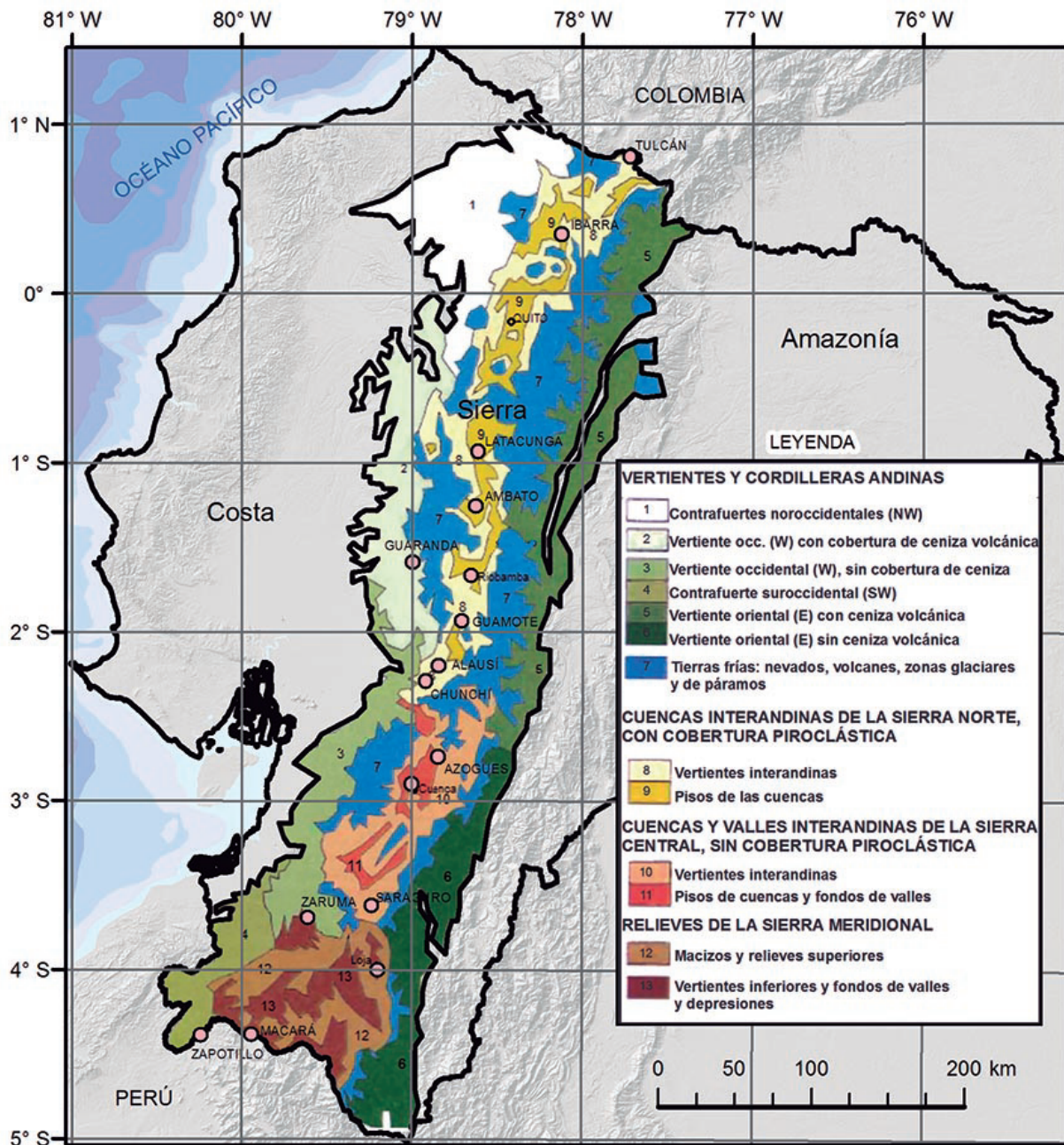


Figura 1.11. Descripción de los paisajes de la Sierra de Ecuador. Adaptado de Winckell, et al. (1997b).

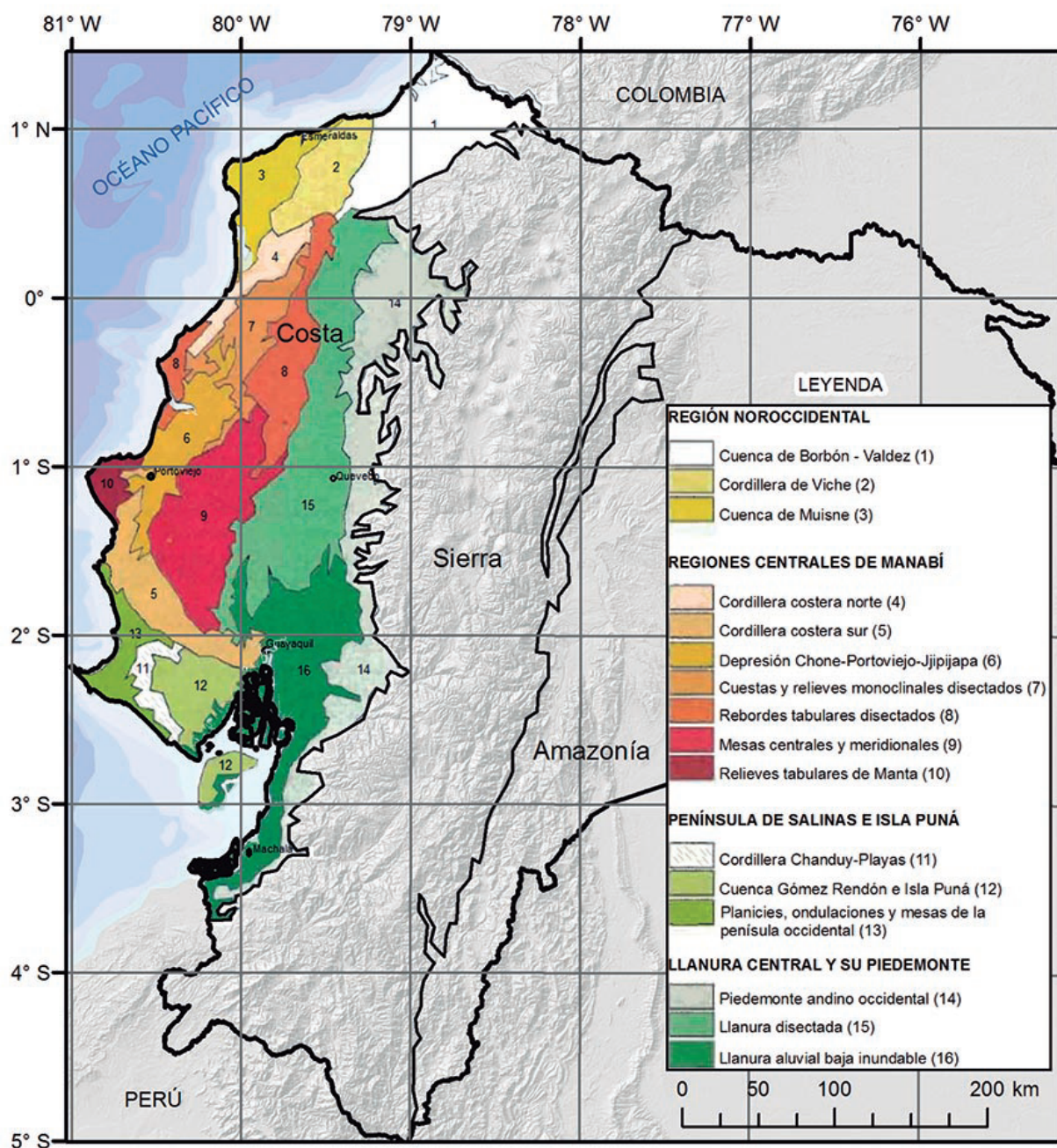


Figura 1.12. Descripción de los paisajes de la Costa de Ecuador. Adaptado de Winckell, *et al.* (1997b).

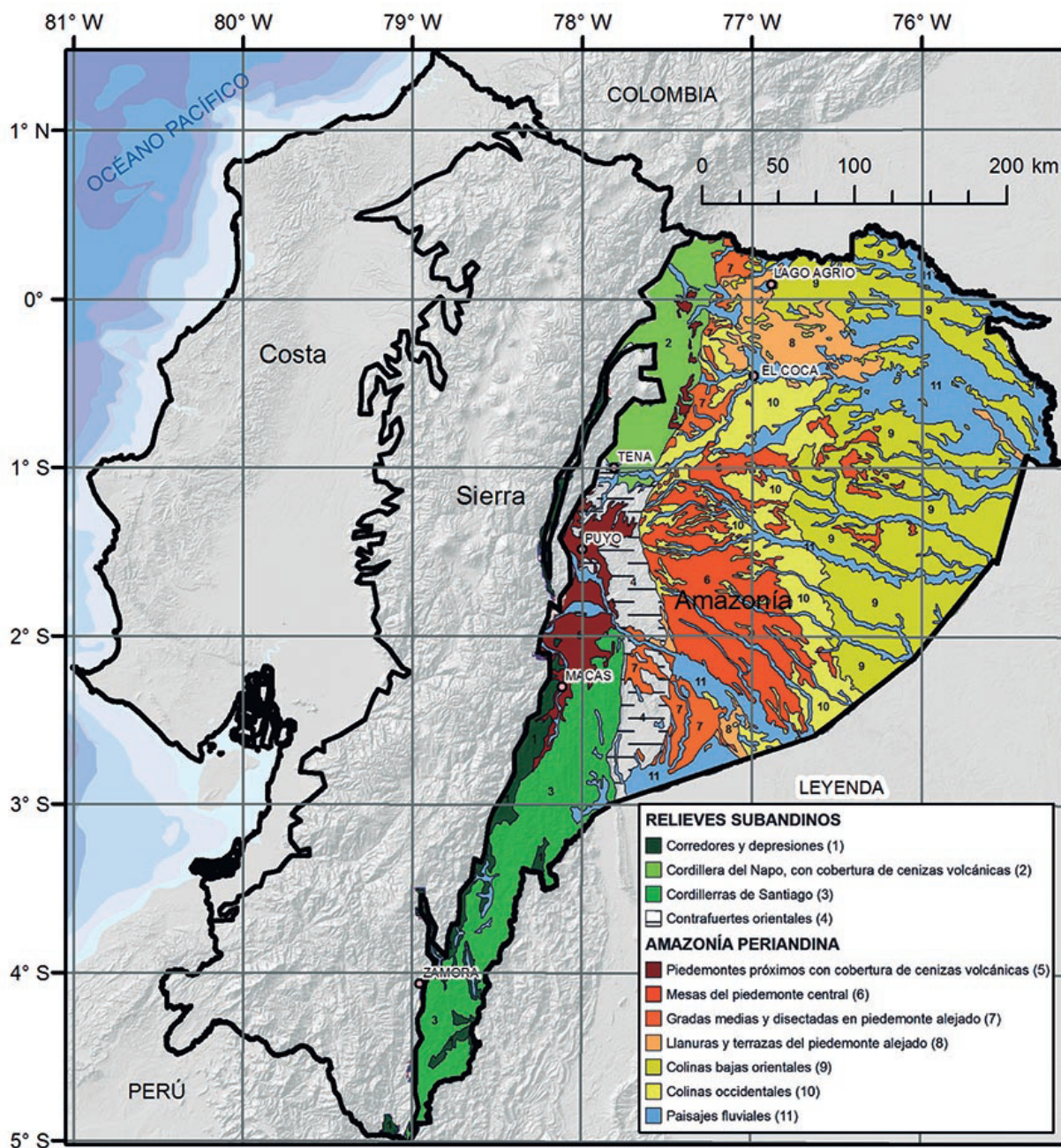


Figura 1.13. Descripción de los paisajes de la Amazonía. Adaptado de Winckell *et al.* (1997b).

Finalmente, los paisajes de las islas Galápagos están divididos en cuatro tipos (**Figura 1.14**): a) islas bajas o partes de islas bajas hasta poco elevadas, b) volcanes escudos sin caldera, c) volcanes escudos con caldera y d) formas comunes al conjunto del archipiélago.

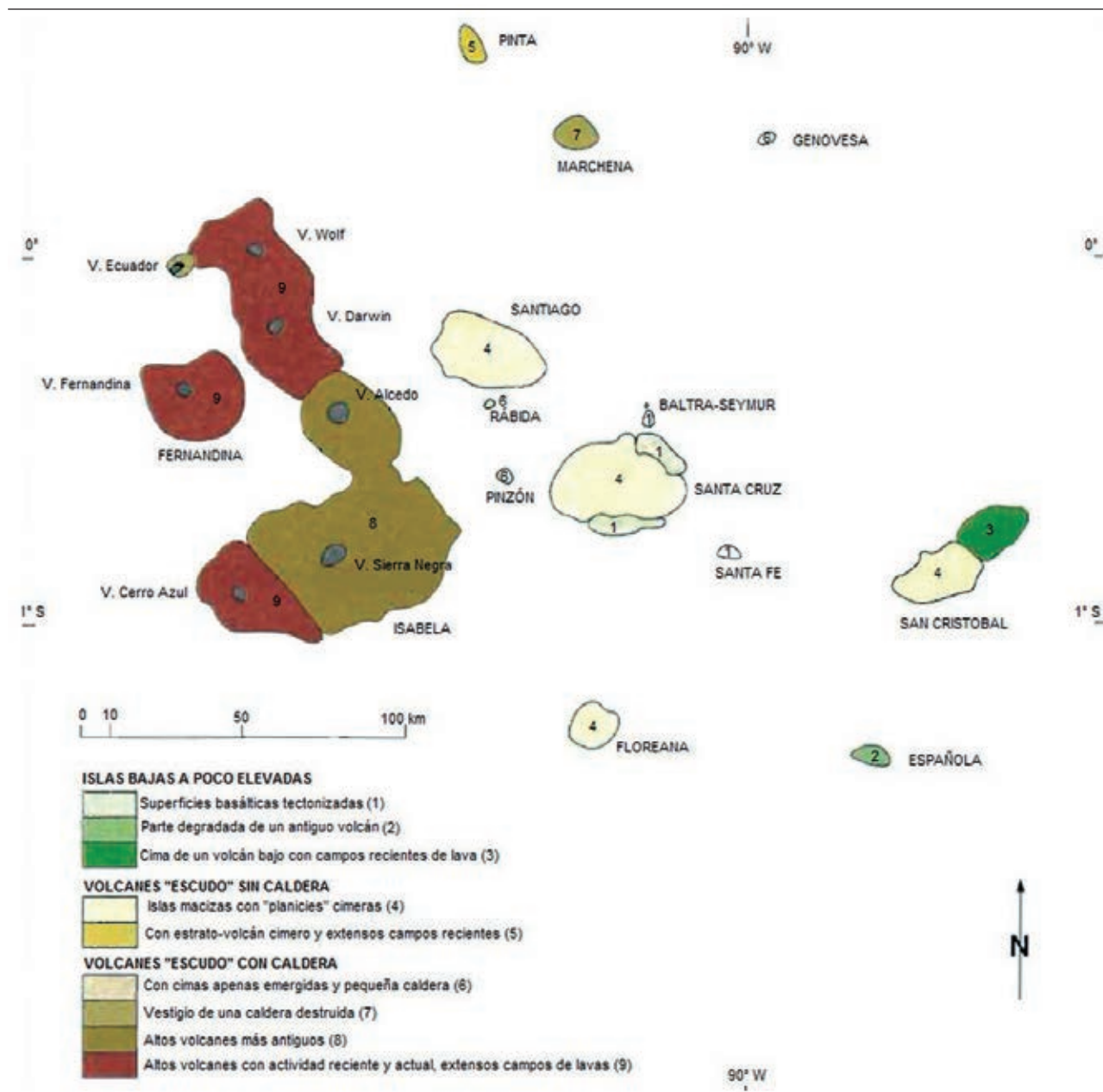


Figura 1.14. Descripción de los paisajes de las Islas Galápagos (Inckell, *et al.*, 1997b).

1.4. Relieve del Ecuador

La presencia de la Cordillera de los Andes, el gran eje montañoso meridiano ubicado en la parte media del Ecuador continental, separa el territorio en tres regiones o conjuntos cuyas delimitaciones y definiciones son innegables. En el centro se ubican los relieves montañosos de la cordillera de los Andes, al oeste las llanuras y relieves colinados de la región costera y al este las cordilleras, colinas y llanuras de la Amazonía (**Figura 1.15**). A estos tres conjuntos se añade el archipiélago de Galápagos, medio insular conformado por islas bajas y altos volcanes activos con caldera (Winckell, 1997).

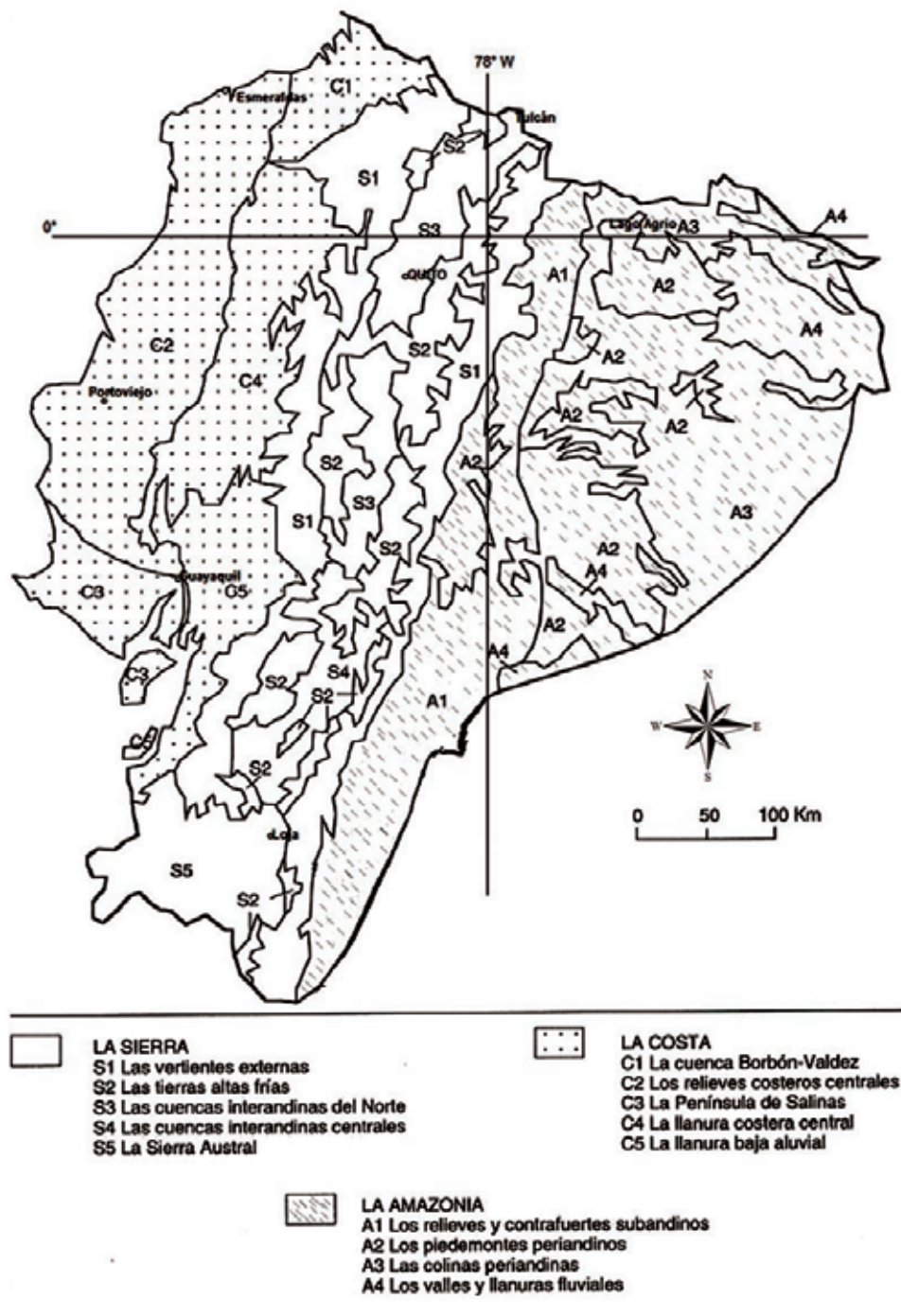


Figura 1.15. Grandes conjuntos de relieve del Ecuador continental (Winckell, *et al.*, 1997b).

1.4.1. Relieves de la Sierra

La Cordillera de los Andes o Sierra es la barrera montañosa meridiana más notoria en el Ecuador, con un ancho que varía entre 100 y 150 km de este a oeste. La parte central es la más estrecha, pero en el sur la barrera se ensancha debido a la presencia de las cordilleras subandinas amazónicas alcanzando entre 180 y 200 km de ancho. En el norte, en la zona ubicada entre la frontera con Colombia y la línea equinoccial, la cordillera tiene una dirección SSO-NNE y SO-NE, con la que se prolonga hacia Colombia. En el centro, entre la línea equinoccial y el paralelo 2° 30' S, la dirección es meridiana. Al sur, entre el paralelo 2° 30' S y la frontera con Perú, la cordillera se orienta en el sentido SSO-NNE, paralela a la línea costanera (Winckell, *et al.*, 1997b).

Andes Septentrionales

Desde Colombia hasta la latitud 2° 15' S (Palmira-Alausí), las cordilleras forman lo que Humboldt denominó la “Avenida de los Volcanes” (Winckell, *et al.*, 1997b), con la presencia de varios volcanes, algunos activos (ej. Tungurahua con 5 023 m s. n. m.) y otros apagados (ej. Chimborazo con 6 310 m s. n. m.). Las dos cordilleras tienen flancos externos muy empinados que son visibles desde la Costa o desde la Amazonía, con elevaciones de hasta 4 000 - 4 500 m s. n. m., de orientación meridiana al centro e incurvada hacia el este en el extremo norte.

Los relieves de esta zona se caracterizan por la huella glaciaria cuaternaria presente en las cimas y por los frecuentes depósitos eólicos de productos volcánicos. Entre las cordilleras se ubica la Cuenca Interandina, que es una depresión de apenas 20 km de ancho en la parte central y que está formada por las hoyas, que son depresiones de extensiones significativas como, por ejemplo, la hoya de Quito y la de otros valles como el Chota. Estas formaciones descansan en rellenos volcánico-sedimentarios y su piso varía entre 1 600 y 3 000 m s. n. m. Las cuencas están separadas por los nudos, estructuras formadas por volcanes coalescentes y que generalmente poseen un sistema hidrográfico particular (Winckell, *et al.*, 1997b).

Andes Centrales

Los Andes Centrales parten desde Palmira-Alausí hacia el sur hasta la latitud de Zaruma-Saraguro. No poseen grandes volcanes recientes como los Andes Septentrionales y se asemejan a un altiplano ensanchado y monótono. El relieve de esta zona fue formado por derramamientos volcánicos, cuya estructura influye en la geomorfología de la zona. El ancho de la plataforma alcanza los 40 km al oeste de Cuenca y su altitud se reduce a medida que se avanza hacia el sur, donde solamente alcanza 3 800 m s. n. m. al oeste de Zaruma. Los valles varían en altitud desde los 1 600 m s. n. m. en Santa Isabel a 2 500 m s. n. m. en Saraguro y se ordenan en dos hileras paralelas orientadas de NE a SO, uniéndose entre sí a través de una sección montañosa ortogonal en el este. Así, Cuenca, Girón y Santa Isabel se ubican al oeste y Gualaceo, Nabón y Saraguro al este. Estos valles se abren hacia la Costa por el occidente a través de los ríos Huigra, Cañar y Jubones (Winckell, *et al.*, 1997b).

Andes Meridionales

Desde la latitud de Zaruma-Saraguro hasta la frontera con el Perú, el relieve es confuso con sitios bajos que se dirigen hacia el SSO y con los sitios más altos que apenas alcanzan los 2 500 m s. n. m. y que no muestran evidencias glaciares (Winckell, *et al.*, 1997b). El relieve en el sur tiene la apariencia de lomos alargados, prevalecen valles transversales ensanchados y con trazados ortogonales como los formados por los ríos Catamayo y Puyango que drenan pequeñas depresiones aisladas que tienen forma distinta. El aspecto fragmentado de los Andes Meridionales es más notorio por la reducción progresiva de altitud de la cordillera occidental y su remplazo por estribaciones ligeras, que poco a poco van convirtiéndose en los relieves más bajos de la Costa Occidental.

1.4.2. Relieves de la Costa

La Costa se inicia al pie de la cordillera occidental con una orientación norte-sur paralela a la Sierra. El ancho de esta franja es variable, alcanza alrededor de 100 km al norte, 180 km en la parte central, mientras que al sur, a la altura de Guayaquil, el ancho disminuye a 20-40 km. En general, el relieve de la Costa es moderado, el sitio más alto tiene 830 m s. n. m. y está ubicado en el centro-sur de la región. La Costa tiene dos partes geográficas diferenciadas: a) relieves costaneros al oeste y al norte, y b) llanuras costaneras al este y al sur (Winckell, *et al.*, 1997b).

Relieves Costaneros Occidentales

Están localizados al oeste, en una línea que une Guayaquil (al sur) con Quinindé (al norte). Estos relieves se dividen en secciones bien marcadas: Costa Norte, Costa Central y Península de Salinas (Winckell, *et al.*, 1997b).

Costa Norte: Entre el río Guayllabamba y la frontera con Colombia existe una gran cuenca, de forma redonda, rodeada de altos relieves colindantes. Por un lado, al sureste, está el flanco occidental de las Cordillera de los Andes y por el otro lado, al suroeste, están las altas colinas de Viche, que vienen a ser la culminación norte de los relieves de la Costa Central, con altitudes de 400 a 600 m s. n. m.

Esta gran depresión, abierta hacia el Océano Pacífico al noroeste, posee relieves muy ligeros, dominados por estructuras tabulares y colinas disectadas de altitudes entre 200 a 400 m s. n. m., que luego, en la cuenca Borbón-Valdez, se convierten en pequeñas colinas y planicies algo onduladas.

Costa Central: Esta formación posee relieves altos caracterizados por una línea de posición central de aproximadamente 20 km de ancho y de 800 m de altitud llamados cordillera de Mache al norte y cordillera de Colonche al sur. Este macizo, de una orientación general de NNE-SSO, toma una curva hacia el sureste (sur de Jipijapa) y luego baja hacia Guayaquil. Este relieve desaparece en el centro, entre Chone y Portoviejo, donde aparecen pocos macizos de aproximadamente 600 m s. n. m.

La Costa Central está bordeada, a ambos lados, por relieves colinarios. Al oeste se localiza una franja angosta de colinas fragmentadas y de poca altitud (400 m s. n. m.), con excepción del relieve localizado al suroeste de Manta, que avanza hacia San Lorenzo, del relieve entre Portoviejo y Chone, con valles fluviales, y del relieve del norte hacia Muisne. Al este, el relieve es más sencillo y está conformado por dos conjuntos físicos: a) relieve con características sedimentarias ubicado al norte, en una línea que va desde Portoviejo al El Empalme y que va decreciendo lentamente en altitud hacia el este y se inclina hacia la llanura oriental, y b) relieve del sur, de vistosos tabularios horizontales, con alturas entre 400 a 450 m s. n. m. que se orientan hacia el Guayas.

Península de Salinas: Esta Península, localizada en el sur de la Cordillera de Colonche, es más compleja y está compuesta por tres zonas diferentes ubicadas de este a oeste. Al centro, en dirección SE-NO, se encuentra una pequeña cordillera angosta y partida en macizos aislados que termina a 420 m s. n. m. en Chanduy. Esta cordillera separa notoriamente las llanuras y mesas bajas del litoral occidental (menos de 150 m s. n. m.) de los relieves colinarios de la cuenca Gómez Rendón al este. El relieve baja progresivamente hasta llegar a los manglares del Golfo de Guayaquil al este. La Isla Puná tiene el mismo tipo de relieve, pero con menor altitud, el sitio más alto llega a 260 m s. n. m.

Llanuras Costaneras Occidentales

Las llanuras van desde Quinindé al norte hasta Huaquillas al sur, con un ancho de 90 km orientadas de este a oeste en Guayaquil y de 15 a 20 km al norte de Machala. Existen dos llanuras: a) llanura central alta y b) llanura aluvial baja.

Llanura Central Alta: Este relieve superficial ondulado se encuentra entre Quinindé al norte y Daule-Catarama al sur. La altitud de 650 m s. n. m. al norte (en Santo Domingo) se reduce a 220 m s. n. m. en Quinindé al noroeste y a 20-40 m s. n. m. en el sur. Esta estructura se origina de conos y llanuras de esparcimiento antiguos ligeramente disectados. El ancho máximo de esta zona es de 80 km al norte de Santo Domingo.

Llanura Aluvial Baja: Este relieve monótono se localiza al sur de la Llanura Central Alta y tiene altitudes inferiores a 20 m s. n. m. Cerca de la desembocadura del río Guayas se encuentran las zonas susceptibles a inundación. La transición con el medio marino son los manglares que abundan en las islas formadas

por los depósitos de sedimentos acumulados en el río Guayas. En el sitio de contacto de la llanura con el pie de la vertiente andina occidental aparecen algunos conos coalescentes que forman el piedemonte. Esta formación, que tiene una extensión de 40 km (entre Bucay y El Triunfo), se caracteriza por tener una suave pendiente hacia el oeste. La angosta faja de 10-15 km, que se prolonga hacia el sur, tiene características parecidas a las descritas anteriormente y está incrustada entre el piedemonte andino al este y los manglares al oeste.

1.4.3. Relieve Amazónico

El relieve de la Amazonía ecuatoriana se divide en tres tipos de formas (Winckell, *et al.*, 1997b): a) relieves subandinos, b) piedemontes periandinos y c) colinas y valles periandinos.

Relieves Subandinos

Se trata de relieves montañosos o submontañosos entre 2 500 y 500 m de altitud. Nombres locales, como las cordilleras de Lumbaquí, Huacamayos, Cutucú o Cóndor, indican los paisajes más elevados o accidentados de estos relieves.

En la parte central de esta formación aparece un extenso piedemonte, con relieves que sobresalen en el sector del Tena, y que se caracterizan por tener una cúpula alargada y maciza, con quebradas y cañones por donde circula la red hidrográfica del río Quijos. El sitio más alto está en el volcán Sumaco con 3 900 m s. n. m., pero la mayoría de puntos altos no pasan de los 2 000 m s. n. m.

Estos conjuntos de relieves están separados de la vertiente andina oriental por una depresión meridiana casi continua, exceptuando el extremo norte. La vertiente empieza en El Chaco al norte y continua hasta El Puyo formando un corredor angosto con flancos empinados, que luego se extiende hacia el sur hasta Zamora. El corredor se ensancha entre Macas y Méndez formando una pequeña depresión por donde pasa el río Namangoza.

El relieve de la parte central prácticamente forma un orificio a la salida del río Pastaza, entre la terminación del río Napo al norte y el pie de la Cordillera del Cutucú al sureste, con altitudes que varían entre 600 y 900 m s. n. m. En esta formación se observan relieves ligeramente colinados o estructuras fosilizadas y quemadas de restos detríticos del piedemonte.

Piedemontes Periandinos

Los Piedemontes Periandinos se encuentran principalmente en la región central de la Amazonía ecuatoriana, a ambos lados del río Pastaza. Estas formaciones están constituidas por dos grandes tipos: a) piedemontes elevados o mesas y b) bajo-piedemontes.

Los piedemontes elevados aparecen desde 1 500 m s. n. m. al oeste de El Puyo, bajando ligeramente hasta los 300 m s. n. m. cerca de la frontera con Perú. Esta formación es un gran cono de esparcimiento tabulario, antiguo y diseccionado que al este se convierte en jirones alargados, disectados, con acantilados, lomas y cimas estrechas que posteriormente se atenúan.

Los bajo-piedemontes se encuentran debajo de los relieves subandinos, desde el Napo al norte hasta la Cordillera del Cutucú al sur. Están formados por niveles escalonados, planos, algo extensos, inclinados hacia el este, con evidencias de esparcimientos aluviales continuos de la red hidrográfica amazónica. El relieve no supera los 600 m s. n. m. al este. Como ejemplo de estas formaciones están las llanuras de Shushufindi al norte y las de Cangaimo al sur.

Colinas y Valles Periandinos

Este relieve monótono, menor a 300 m s. n. m., está formado por colinas desarrolladas sobre rocas sedimentarias terciarias y recubrimientos continuos a los esparcimientos cuaternarios. La monotonía se intensifica debido a la cobertura forestal que cubre de manera homogénea el relieve. Entre estas colinas se encuentran las grandes llanuras aluviales, que son valles anchos, ubicados básicamente entre los ríos Napo y Aguarico. El relieve también incluye pantanos y zonas inundadas que se formaron por efecto de los desbordamientos de los ríos que constituyen la red hidrográfica amazónica.

1.4.4. Relieve de las Islas Galápagos

El Archipiélago de Galápagos está formado por un conjunto de 5 islas grandes, 14 medianas y 68 islotes o rocas, que alcanza una superficie aproximada de 8 000 km². Está ubicado en la línea ecuatorial, a 1 000 km al oeste de la Costa ecuatoriana.

Morfológicamente, en el Archipiélago se distinguen tres agrupaciones: a) islas bajas y poco elevadas (ej. Baltra, Seymour), con relieve ligeramente ondulado y con alturas que no pasan los 220 m s. n. m.; b) volcanes escudo sin caldera (ej. Floreana, Santiago y Santa Cruz), que son volcanes antiguos elevados (920 m s. n. m.), sin calderas y sin actividad, exceptuando el flujo de lavas en la Pinta y Santiago; c) volcanes escudo bajos con caldera (ej. Marchena, Rábida); y c) grandes volcanes escudo con calderas cimera (ej. Isabela) (Figura 1.16) (Winckell, 1997).



Figura 1.16. Tipos de islas del archipiélago de Galápagos. Adaptado de Winckell (1997).

Los volcanes de las islas Galápagos se distinguen de la siguiente forma: a) cimas de volcanes bajos, con una pequeña caldera cimera (ej. Genovesa, Pinzón con 435 m s. n. m.); b) vestigios de grandes volcanes destruidos con una altura cercana al nivel del mar (ej. isla Marchena, volcán Ecuador); y c) volcanes majestuosos de las

islas Fernandina e Isabela, con altitudes de 1 660 m s. n. m. (volcán Wolf) y 1 080 m s. n. m. (volcán Sierra Negra). Estos últimos volcanes tienen forma de escudo, con vertientes inferiores ligeras, flancos superiores fuertes y una cima con un hoyo en el centro formado por una caldera de hundimiento. Algunos escudos tienen ligera actividad fumarólica, con flancos cubiertos por vegetación (ej. volcán Alcedo), mientras otros todavía emiten de lava volcánica, como por ejemplo los volcanes Sierra Negra y Cerro Azul (**Figura 1.14**).

1.5. Evolución Geodinámica del Ecuador

Geológicamente, el Ecuador está localizado en el punto de unión de los Andes centrales con los Andes septentrionales, al nivel del Rift de las Galápagos, que es una zona de expansión oceánica de este a oeste que separa la placa de Nazca (sur) de la placa de Cocos (norte) (Marocco y Winter, 1997; Winckell, 1997; Collot, *et al.*, 2009).

La Costa está formada por rocas magmáticas de origen oceánico que se acoplaron al continente a finales del Cretácico (hace aproximadamente 80 millones de años), cubiertas por zonas sedimentarias marinas de edad terciaria o cuaternaria (**Figura 1.17**).

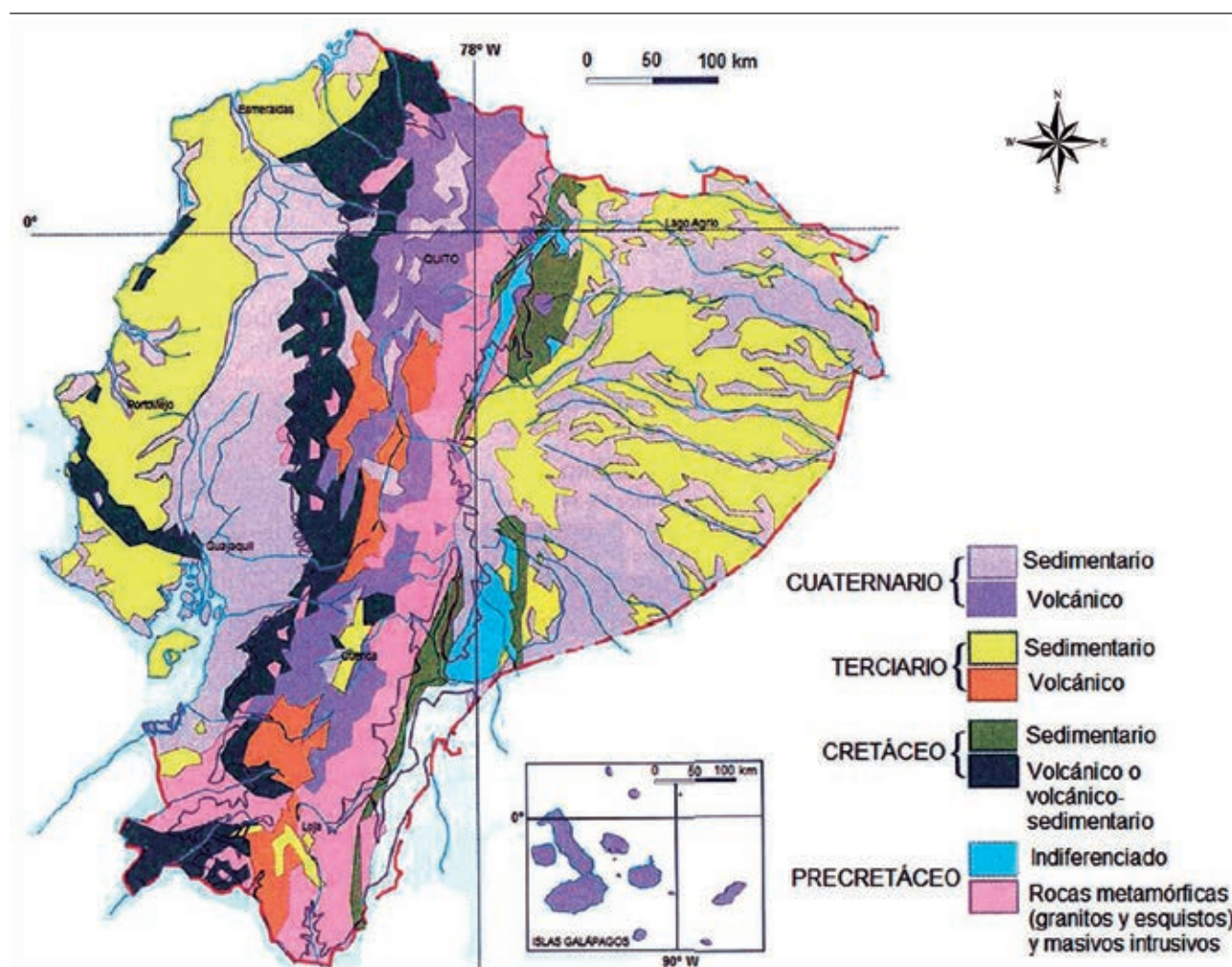


Figura 1.17. Mapa geológico del Ecuador (León, 2010).

Los Andes están formados por cortezas continentales cubiertas por rocas sedimentarias y magmáticas deformadas de diferentes edades. Se formaron como resultado de un proceso geológico complejo iniciado en el Precámbrico, en el cual se alternaron ciclos de sedimentación, magmatismo y deformación. La Cordillera Occidental, la más joven, es el resultado del aplastamiento de volcanes. La Cordillera Oriental

fue formada en el Mesozoico por rocas sedimentarias y magmáticas. El valle interandino, localizado entre las dos cordilleras se formó en el Cenozoico y dio lugar a cuencas sedimentarias continentales afectadas por actividad tectónica y por volcanismo plio-cuaternario reciente (Apsden, *et al.*, 1988; Marocco y Winter, 1997) (**Figura 1.17**).

El piedemonte oriental (zona subandina), que une los Andes con el Escudo Guyano-Brasileño, se caracteriza por tener bajas altitudes y está formado por una corteza continental cubierta por zonas sedimentarias del período Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, pero la mayor parte de las deformaciones aparecieron durante el Cenozoico (**Figura 1.17**) (Marocco y Winter, 1997).

1.6. Regiones Climáticas y Formaciones Vegetales Naturales

El Ecuador se encuentra en el cinturón de bajas presiones ecuatoriales, en la zona de oscilación del Frente Inter Tropical (FIT) o zona de convergencia intertropical, que genera masas de aire continental seco y relativamente fresco sobre la mayor parte del país desde mayo-junio hasta septiembre-octubre, y masas de aire oceánico húmedo y caliente el resto del año.

Esta zona del FIT afecta de manera diferente a las tres regiones del país (Huttel, 1997). En la Costa, esta zona es más o menos duradera dependiendo de la latitud, generando una sola estación lluviosa con su máximo en el mes de marzo. El clima de esta región también es influenciado por las oscilaciones latitudinales de dos corrientes marinas antagónicas que se asocian a masas de aire oceánico y que acompañan al desplazamiento del FIT por ambos lados de la línea ecuatorial: una masa de aire caliente y húmedo acompaña a la corriente caliente del Niño que viene desde el Golfo de Panamá (al norte) y que llega a las costas del Ecuador de diciembre a mayo. Las aguas calientes se convierten entonces en lluvias que van disminuyendo hacia el sur. La otra corriente marina es la fría de Humboldt que viene desde el sur y se asocia a masas de aire fresco y seco que prevalecen en las costas ecuatorianas el resto del año. Esta corriente genera una estación seca y fresca que es más acentuada en el sur del país. Los cambios del movimiento de estas dos corrientes, causadas posiblemente por los vientos, dan como resultado lluvias anómalas que son bajas cuando predomina la corriente de Humboldt sobre la del Niño y fuertes cuando predomina la del Niño como sucedió en los años 1982 y 1983, cuando el fenómeno del Niño se marcó en la región.

En la región Andina, el FIT sigue el movimiento aparente del sol que cruza la línea ecuatorial dos veces al año, causando lluvias en ambos casos, condición que produce dos períodos húmedos separados por dos períodos secos. Las primeras lluvias (marzo-junio) corresponden al ascenso del FIT hacia el norte. El segundo ciclo de lluvias (octubre-diciembre) corresponde al descenso hacia el sur, llegando hasta cerca de 5° de latitud sur. En el período seco predominan las masas de aire continental seco y fresco que llegan del sur-este.

En la Amazonía, el paso del FIT prácticamente no afecta la normal masa de aire caliente y húmedo, lo que genera un régimen de lluvias usualmente uniforme durante todo el año, con un máximo en los meses de junio y julio.

El clima del Ecuador se puede clasificar de acuerdo a tres parámetros (Pourrut, 1983; Huttel, 1997): a) régimen anual de precipitaciones, que a su vez se clasifica en clima uniforme (estación lluviosa o seca marcada), clima tropical (con una estación lluviosa y una seca) y clima ecuatorial (con dos estaciones lluviosas y dos secas); b) valores de las lluvias anuales (**Figura 1.18**), con clima árido (precipitaciones anuales < 500 mm), clima seco (entre 500 y 1 000 mm), clima húmedo (1 000 a 2 000 mm) y clima muy húmedo (> 2 000 mm); y c) rangos de temperaturas medias anuales, que incluyen climas megatérmicos (temperaturas medias anuales > 22 °C), climas mesotérmicos (entre 12 y 22 °C) y climas fríos o microtérmicos (temperaturas < 12 °C). Estos parámetros, a su vez, dividen al país en nueve zonas de influencia climática (**Figura 1.19**). En la Costa: a) clima tropical megatérmico árido; b) clima tropical megatérmico seco; y c) clima tropical megatérmico húmedo. En la Sierra: a) clima

ecuatorial mesotérmico húmedo; b) clima ecuatorial mesotérmico seco; c) clima ecuatorial frío; y d) clima ecuatorial megatérmico muy húmedo. En la Amazonía el clima se clasifica como uniforme megatérmico muy húmedo y en las Islas Galápagos como clima ecuatorial insular.

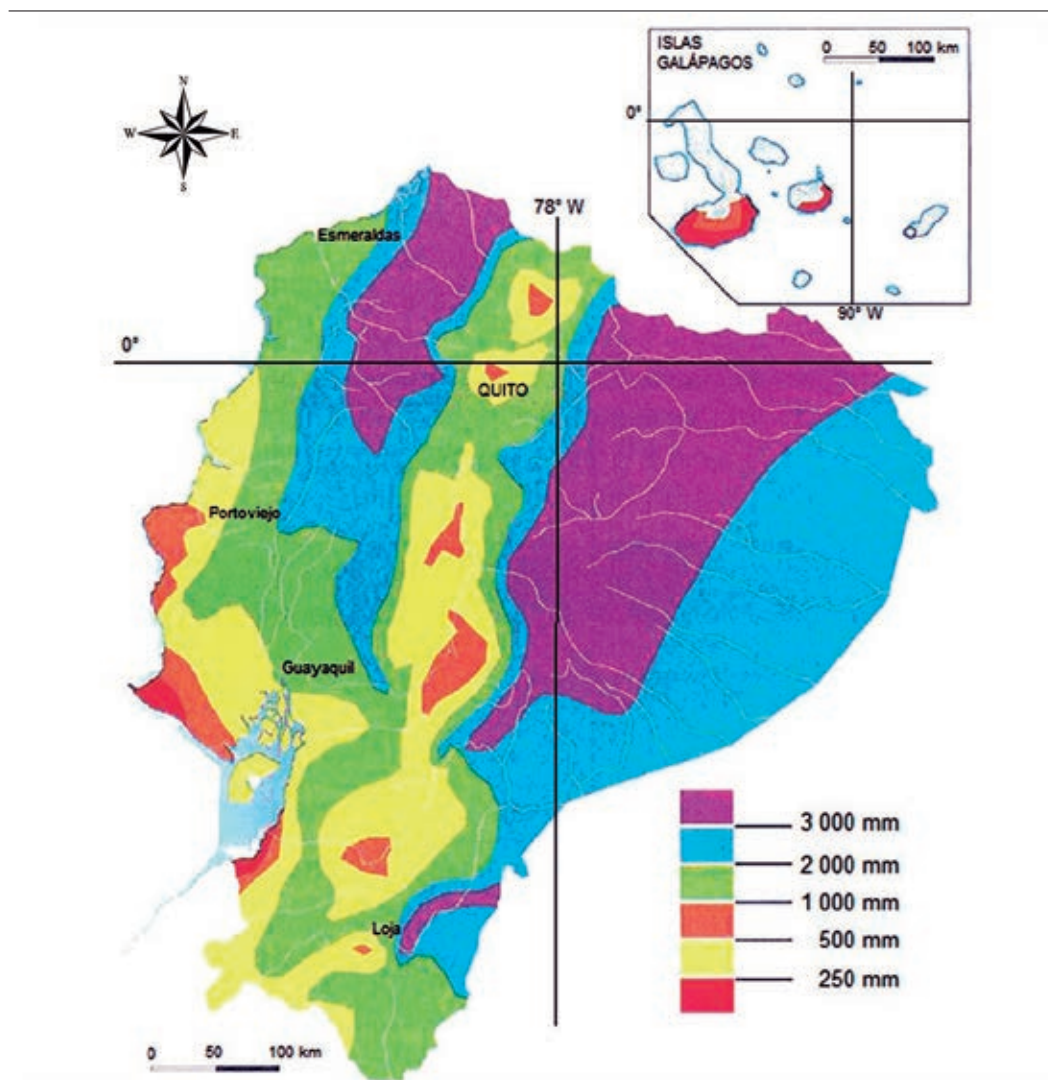


Figura 1.18. Pluviometría anual en el Ecuador (Pourrut, 1983; León, 2010).

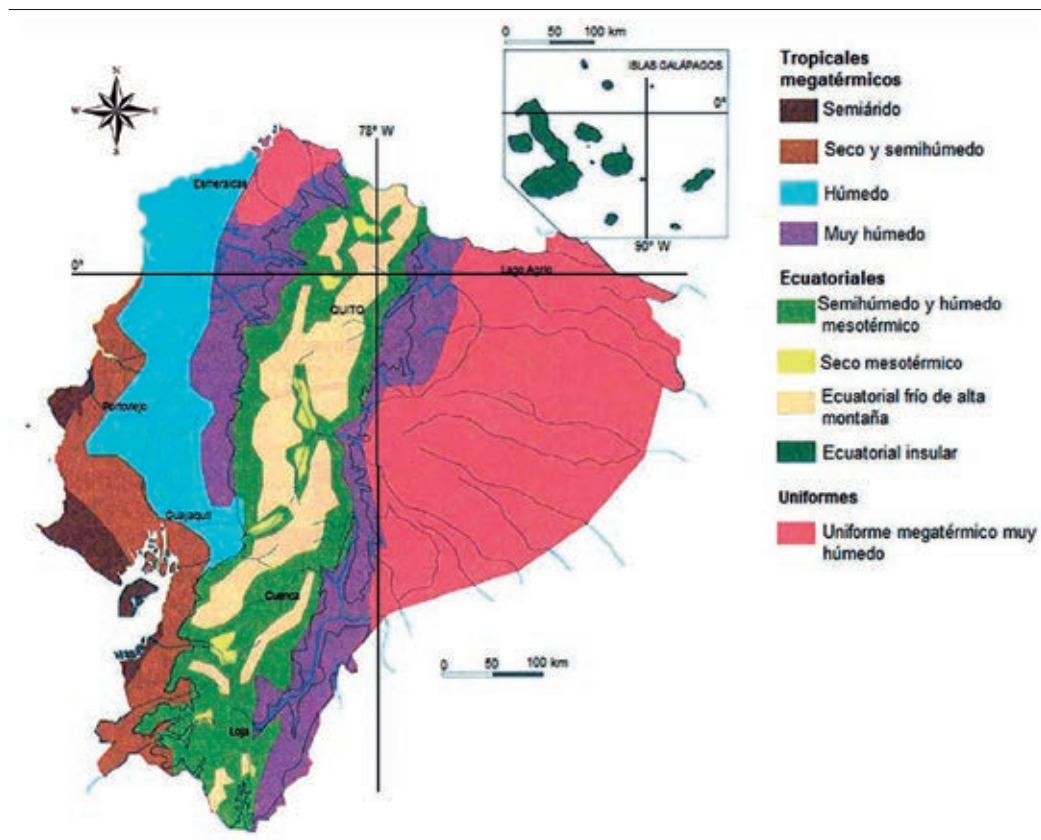


Figura 1.19. Tipos de climas en el Ecuador (Pourrut, 1983; León, 2010).

Con respecto a las formaciones vegetales, los principales factores que determinan la distribución de la vegetación natural y la de los cultivos son la temperatura y la pluviometría. Las temperaturas en el Ecuador son prácticamente constantes por piso altitudinal a lo largo del todo el año (los datos de las estaciones climatológicas muestran que existe una disminución de las temperaturas promedio anuales del orden de 1°C por cada 300 m de altitud) (Huttel, *et al.*, 1999). Por otro lado, hay otros parámetros climáticos que también afectan la distribución de los cultivos; así, en la región costera se encuentran valores elevados de insolación solo en la franja litoral y éstos disminuyen rápidamente tierra adentro, debido a las neblinas de la estación seca (garúa) en los relieves costeros o a las nubes casi permanentes de las vertientes andinas. Estas condiciones generan un efecto positivo al prolongar la estación húmeda más allá de la estación lluviosa, permitiendo la ampliación de ciertos cultivos fuera de su zona climática óptima. Las cuencas interandinas y, en menor medida, la llanura amazónica tienen valores altos de insolación (Figura 1.20).

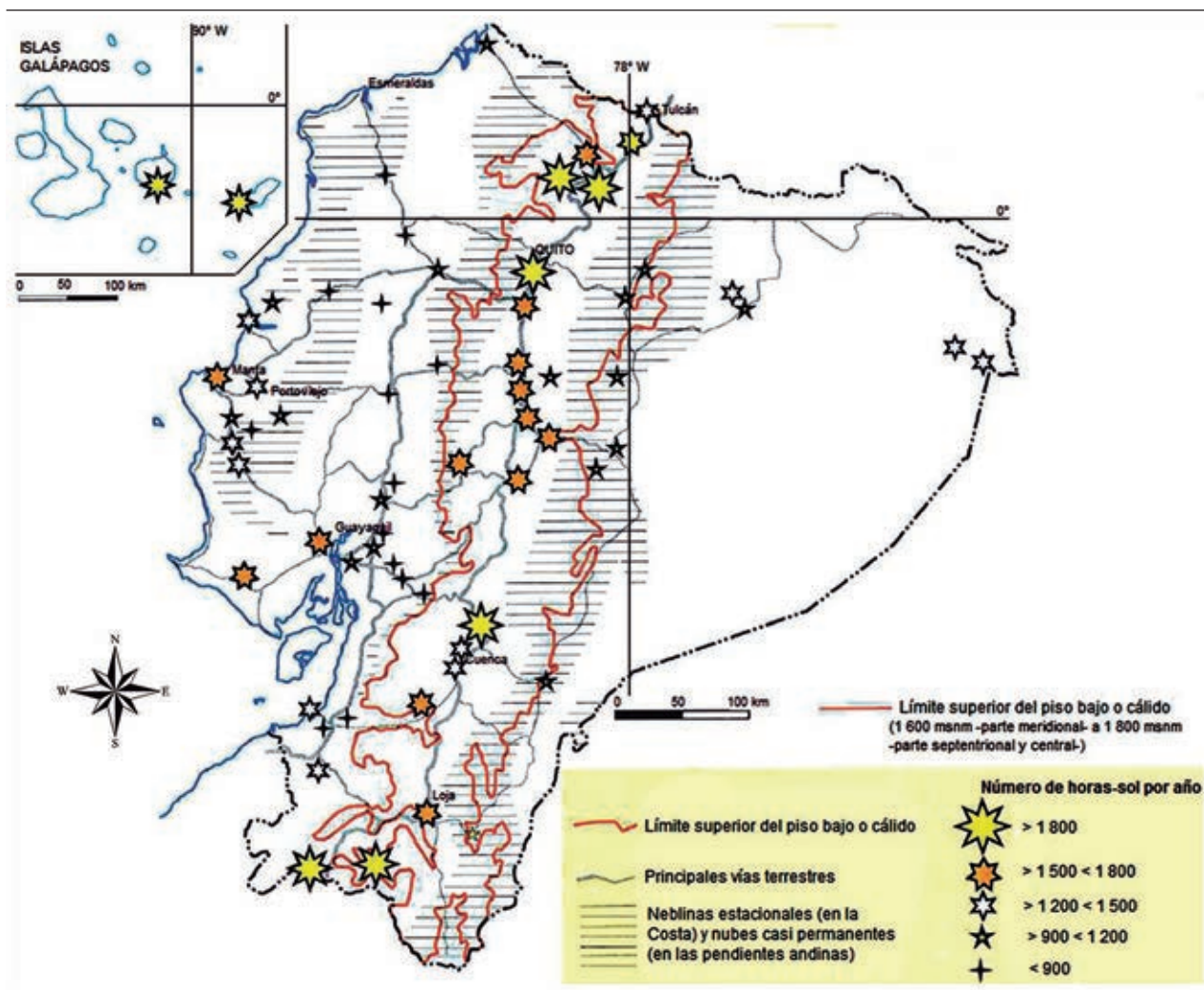


Figura 1.20. Repartición de las principales zonas con neblinas o nubes (permanentes o estacionales) y rangos de heliofanía anual (Huttel, *et al.*, 1999).

De igual manera, la revisión cronológica de Huttel (1997) sobre la clasificación de las coberturas vegetales naturales del Ecuador incluye citas como la de Acosta Solís (1977), quien propone una clasificación geobotánica con base a la temperatura y precipitación, y la de Cañadas (1983), quien combina los dos factores climáticos según el método de Holdridge, generando una cartografía de bio-climas, donde se especifica la localización de algunas plantas características del país. Sin embargo, Huttel considera que las clasificaciones de ambos autores no son perfectas y que la clasificación de Naranjo (1981) es la más satisfactoria. La clasificación de Naranjo, junto con la propuesta por Patzelt y Echeverría (1985) y la de Sarmiento (1987) proporcionan información global sobre los tipos de vegetación del Ecuador.

Huttel también realizó sus propias observaciones durante sus salidas al campo (recolectando más de 2 000 muestras de herbario) y describió en detalle los principales grupos y especies vegetales de las diferentes zonas en cada piso altitudinal de la siguiente forma (**Figuras 1.21 y 1.22**): a) piso de baja altitud (temperaturas $> 20^{\circ}\text{C}$: límite superior alrededor de 1 800 m s. n. m., en la parte septentrional y central, y hacia los 1 600 m s. n. m. en su parte meridional), con vegetación de zonas áridas, muy secas, secas, húmedas, muy húmedas, hiper-húmedas, formaciones vegetales azonales y vegetación de las Islas Galápagos; b) piso intermedio (temperaturas promedio anuales entre 13 y 20°C : entre los 1 800 a 3 200 m s. n. m. en el norte y 1 600 a 2 800 m s. n. m. en el sur), que incluye la vegetación de las vertientes exteriores de los Andes, las depresiones intra-andinas y vegetación azonal; c) piso alto (límite inferior de 2 800 m s. n. m. en el sur y de 3 200 m s. n. m. en el norte, con un límite superior de alrededor de 3 600 m s. n. m.), con vegetación de zonas hiper-húmedas, muy húmedas, húmeda y seca; y d) piso muy alto (temperaturas promedio anual inferior a 10°C), que incluye vegetación como el matorral y el páramo.

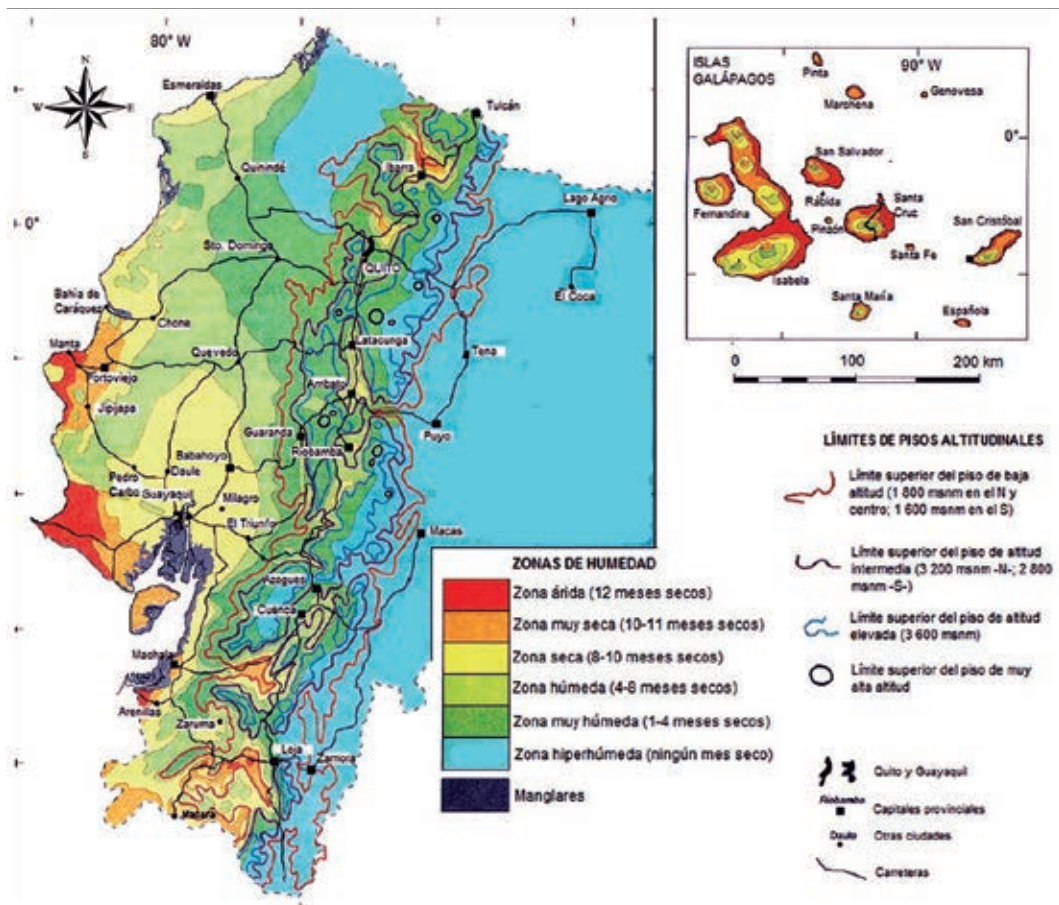


Figura 1.21. Pisos altitudinales y zonas de humedad (Huttel, *et al.*, 1999).

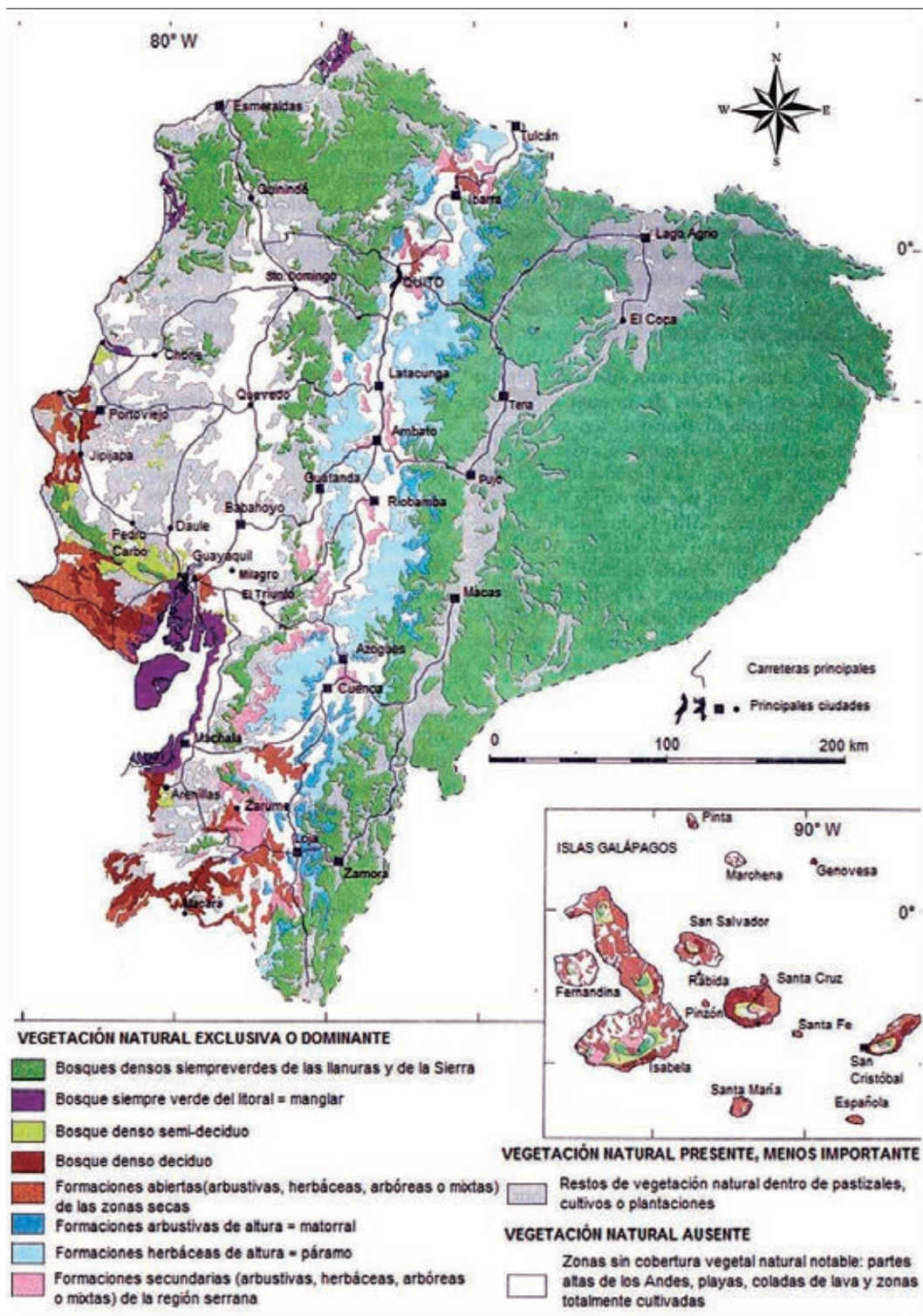


Figura 1.22. Distribución de las formaciones vegetales naturales en Ecuador (Huttel, *et al.*, 1999).

1.7. Hidrografía e Hidrología del Ecuador

La Hidrología depende del relieve, grado de alteración de las rocas, clima y vegetación (Pourrut, 1997), siendo el relieve y la precipitación los factores más relevantes en el trazado y densidad de la red hidrográfica. Por lo tanto, los ríos, la orografía y las lluvias interactúan estrechamente, generando una fuerte correlación. El Ecuador, con su relieve peculiar, posee una gran diversidad de regímenes hidrológicos y una significativa heterogeneidad de sistemas de aguas superficiales dependientes de la diversidad de las condiciones físico-climáticas.

Estas condiciones presentan ventajas y desventajas. Entre las ventajas está el hecho de que Ecuador es un país rico en recursos hídricos. Existe una escorrentía media total (volumen de agua procedente de las precipitaciones que se escurre por los cauces superficiales y subterráneos) de 432 000 hm³/año, con una escorrentía específica de 1 600 mm/año, muy superior a la media mundial que es del orden de 300 mm/año (FLACSO, *et al.*, 2008). Tomando en cuenta las irregularidades temporales y espaciales, la disponibilidad media de agua es de 14 809 m³/habitante/año, superior a la media mundial de 10 800 m³. Se ha calculado que el potencial bruto hidroeléctrico de Ecuador es de alrededor 643 000 gigawatios hora/año (Gwh/año).

Hasta el año 2010 se utilizaron solamente 6 200 Gwh/año (León, 2010). Con la incorporación de las centrales hidrolécticas construidas en los últimos años la utilización de energía hidroeléctrica se incrementó y que en agosto del 2019 fue de alrededor de 23 000 Gwh (ARCONEL, 2019), todavía lejos el potencial establecido. La principal desventaja de este amplio sistema hidrológico es el alto potencial de erosión del suelo promovido por el exceso de escorrentía. Se considera que la degradación por erosión en la región andina remueve del sitio alrededor de 1 000 t de suelo/km²/año, pudiendo alcanzar en algunos casos cantidades de hasta 6 000 t/km²/año (Pourrut, 1997).

La clasificación de los regímenes hidrológicos del Ecuador se hizo apoyándose en la clasificación del régimen de los ríos que se basa en dos criterios: a) naturaleza y origen de las aguas altas (pluviales, nieves, glaciares) y b) simplicidad o complejidad de la variación anual de los caudales (regímenes sencillos, mixtos y complejos). Según esto, las nueve grandes clases de redes y regímenes hidrológicos del Ecuador son (**Figura 1.23**): a) régimen pluvial tropical semi-húmedo de la Costa, con precipitaciones anuales de 500 a 2 000 mm; b) régimen pluvial tropical muy húmedo de la Costa septentrional, pluviometrías superiores a 3 000 mm; c) régimen pluvial tropical árido de la Costa meridional, pluviosidad inferior a 500 mm; d) régimen pluvial tropical complejo de la Cuenca del Guayas; e) régimen pluvial tropical complejo de los exteriores de la Cuenca del Guayas (ladera exterior de la Cordillera occidental y particularmente los ríos Angamarca, Prieto, Chanchán, Bulubulu y Cañar), precipitaciones siempre superiores a 2 000 mm concentradas entre enero y abril; f) régimen pluvio-nival interandino; g) régimen pluvial andino meridional con influencia oriental; h) régimen glacio-nival de montaña; e i) régimen pluvial persistente muy húmedo de la región Amazónica, con precipitaciones de alrededor de 2 000 mm (valles de Palora y Zamora) y 6 000 mm anuales (zona del volcán Reventador).

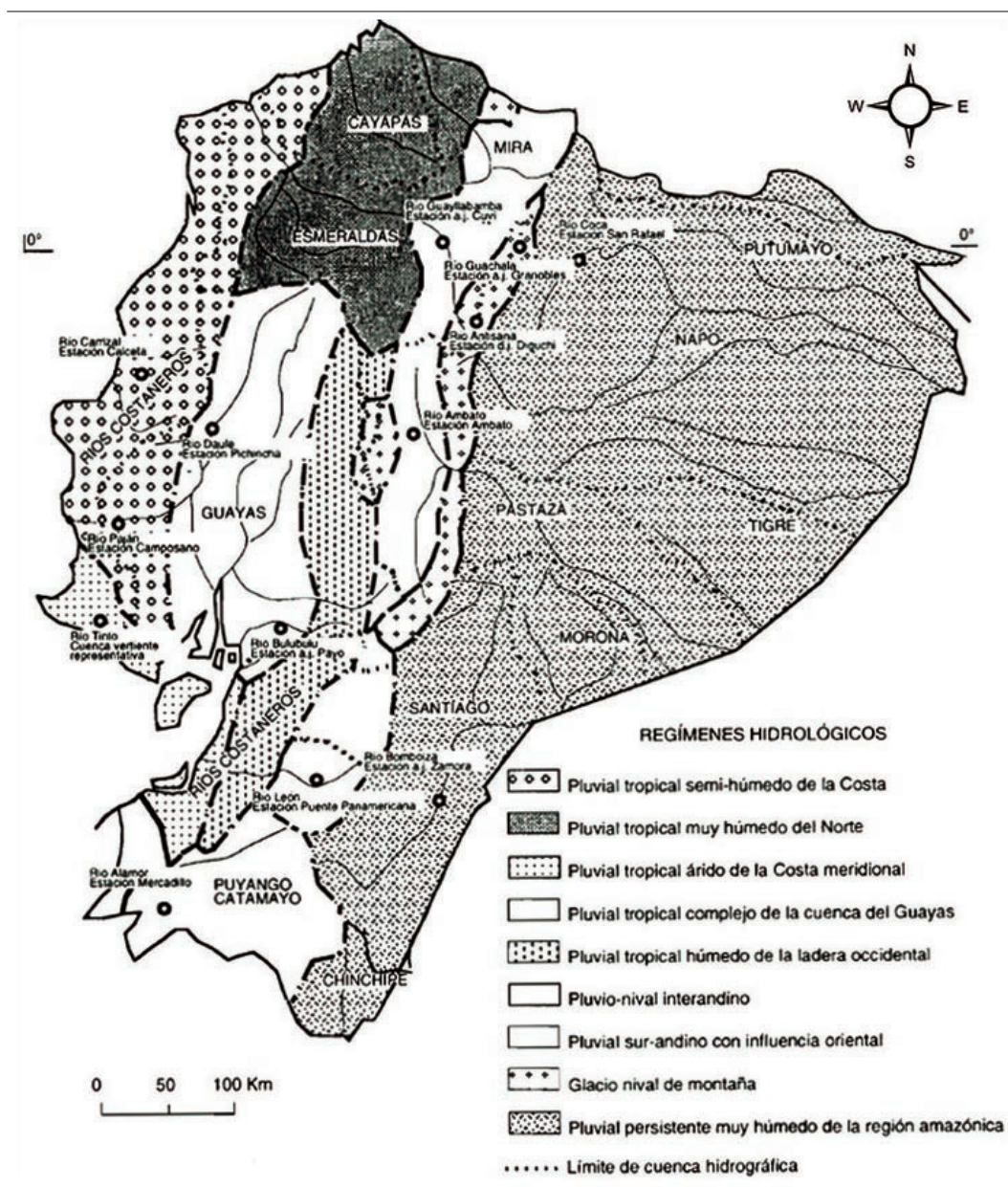


Figura 1.23. Regímenes hidrológicos del Ecuador continental (Pourrut, 1997).

1.8. Pedogénesis y los Suelos del Ecuador

La información más relevante sobre la pedogénesis y los suelos del Ecuador fue publicada por Zebrowski y Sourdat (1997) y Huttel, *et al.* (1999). Estos autores agruparon los suelos del país en tres conjuntos basándose en los materiales sobre los cuales se desarrollaron: a) suelos aluviales; b) suelos sobre cenizas volcánicas; y c) suelos sobre otros materiales (rocas antiguas). Dentro de cada conjunto se definieron categorías por sus características morfológicas, mineralógicas o físico-químicas, como se describen en la **Figura 1.24** y el **Cuadro 1.1**.

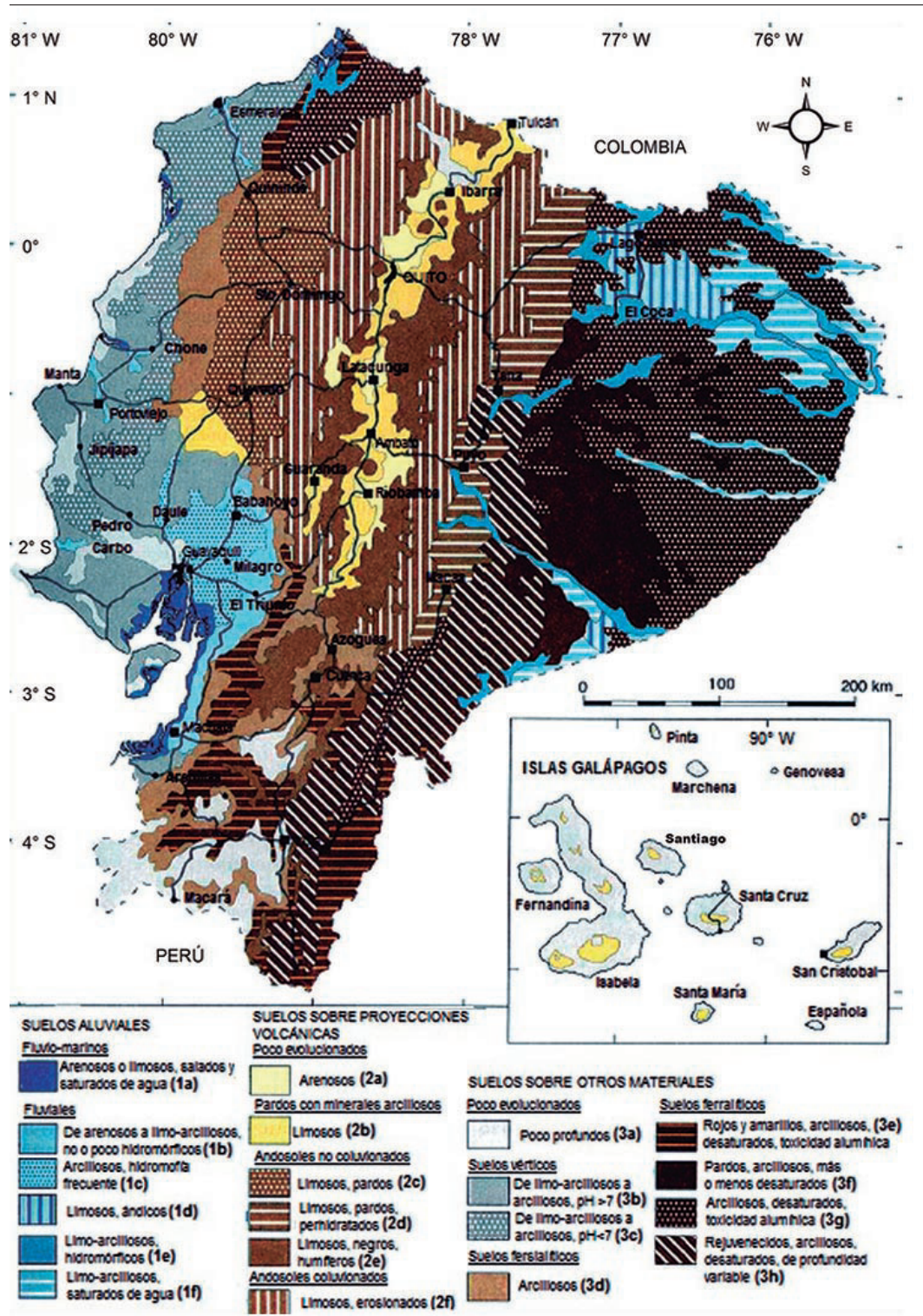


Figura 1.24. Descripción de la pedogénesis y los principales tipos de suelos del Ecuador (Huttel, *et al.*, 1999) (las siglas se mencionan en el Cuadro 1.1)

Cuadro 1.1. Grandes tipos de suelos del Ecuador y sus limitaciones para la agricultura (Huttel, *et al.*, 1999).

Relieve	Suelos	Limitaciones	Sigla
Región Amazónica			
Lomas	Ferralíticos y pseudo-ferralíticos desaturados	Nutrientes escasos, toxicidad de aluminio	3g
Lomas con cobertura de proyección volcánica	Andosoles perhidratados	Nutrientes escasos	2d
Mesa disectada	Pardos ferralíticos	Nutrientes escasos, toxicidad de aluminio localizada	3f
Lomas con pendientes fuertes	Ferralíticos rejuvenecidos	Pendientes fuertes, nutrientes escasos y toxicidad de aluminio	3e-3h
Llanura aluvial	Aluviales ácidos	Nutrientes escasos	1d
Aluviones fluviales	Hidromórficos	Exceso de agua	1e
	Hidromórficos orgánicos	Agua permanente	1f
Región Sierra			
Zona septentrional con proyecciones volcánicas			
Vertientes exteriores	Andosoles erosionados y coluvionados	Suelos heterogéneos, pendientes muy fuertes	2f
Vertientes y cuencas intraandinas	Pardos, limosos	Pendientes fuertes	2b
	Arenosos	Deficiencia de materia orgánica y de reservas de agua	2a
Zona meridional sin proyecciones volcánicas			
Vertientes exteriores orientales	Ferralíticos rejuvenecidos	Suelos heterogéneos, nutrientes escasos, toxicidad de aluminio, pendientes muy fuertes	3h
Vertientes exteriores occidentales, cuencas y vertientes intra-andinas			
	Ferralíticos	Nutrientes escasos, toxicidad de aluminio, pendientes fuertes	3e
	Fersilalíticos	Pendientes fuertes	3d
	Vérticos	pH alcalino	3b
	Poco evolucionados erosionados	Suelos poco profundos	3a
Páramos (altitud superior a los 3 800 m s.n.m.)			
	Negros, humíferos	Temperatura baja	2a
Región Costa			
Lomas y mesas	Ferralíticos rojos y amarillos	Nutrientes escasos, toxicidad de aluminio, pendientes fuertes	3e
	Ferralíticos rejuvenecidos	Nutrientes escasos, toxicidad de aluminio	3h
	Ferralíticos y pseudo-ferralíticos	Nutrientes escasos, toxicidad de aluminio	3g
	Fersilalíticos	Pendientes fuertes	3d
	Pardos, vérticos	Pendientes fuertes	3c
	Poco evolucionados	Suelos poco profundos	3a
Lomas de pendientes débiles	Vérticos	pH fuerte	3b
Llanuras con cobertura de proyecciones volcánicas	Andosoles	Sin limitaciones	2c
	Suelos pardos	Sin limitaciones	2b
Llanuras sin cobertura de proyecciones volcánicas	Vérticos	pH fuerte	3b
Llanura aluvial	Aluviales arenosos y limosos	Textura gruesa	1b
	Aluviales arcillosos	Textura fina	1c
	Hidromórficos	Exceso de agua	1e
Aluviones fluvio-marinos	Salados	Agua permanente y sal	1a
Región Insular			
Volcanes de pendientes fuertes	Poco evolucionados	Suelos superficiales	3a
	Andosoles y suelos ferralíticos	Suelos poco profundos	2c-3d

Los suelos aluviales se formaron sobre materiales sedimentarios recientes y pertenecen a dos medios bien distintos: el medio fluvio-marino y el medio fluvial.

Los suelos del medio fluvio-marino están localizados en las playas, en los cordones litorales y en los manglares, con suelos francos o franco-arcillosos saturados de agua y salinos. En esta clasificación también se encuentran los suelos de la sección posterior del manglar ubicados en zonas emergidas, sin vegetación por el alto contenido de sales y que se utilizan para la construcción de camarónicas.

Los suelos del medio fluvial pueden ser: a) suelos fluviales minerales, en su mayoría suelos aluviales de la región Costa y una gran parte de los suelos de la Amazonía, divididos en conjuntos dependiendo del grado de saturación del complejo de intercambio y de la textura; o b) suelos fluviales orgánicos, ubicados en zonas deprimidas, principalmente en la Amazonía, donde el humedecimiento constante de los perfiles permite la acumulación de restos vegetales parcialmente descompuestos, es decir, son suelos hidromórficos orgánicos, raramente minerales y con gley, donde el horizonte orgánico está constituido por materiales fibrosos de espesor considerable (hasta 2 m), muy ácido ($\text{pH} \approx 4.5$), pobre en bases y desaturado (5 %), y los horizontes minerales más profundos son gleyificados, francos o franco-arcillosos, fluidos o plásticos, moderadamente ácidos ($\text{pH} \approx 5.7$), ricos en bases y saturados (50-90 %).

1.8.2. Suelos sobre cenizas volcánicas

Estos suelos ocupan más del 30 % del territorio del Ecuador y son importantes desde el punto de vista agronómico. Son muy diversos y van desde el nivel del mar hasta los 5 000 m s. n. m. La diversidad de sus características se debe a la variedad de climas bajo los cuales se desarrollaron y su pedogénesis depende de la naturaleza y edad de los materiales de los que se formaron. Se considera que la totalidad de las cenizas a partir de las cuales se formaron los suelos actuales tienen una edad entre 2 600 y 1 600 años, calculada con base a las fases de erupción de los volcanes (Zebrowski and Sourdat, 1997).

Dentro de estos suelos se encuentran aquellos formados sobre los materiales provenientes de las emisiones volcánicas. En la Sierra se presentan como depósitos de lapilli de espesor considerable. En las regiones más elevadas de los Andes, los suelos derivados de cenizas han desaparecido por la erosión glaciaria, en especial la de la última glaciación. En algunas regiones secas de las cuencas interandinas, la erosión de las cenizas recientes permite ver los antiguos depósitos que ocurren en forma de capas cementadas, conocidas como cangahuas.

Las cenizas recientes cubrieron las cenizas antiguas, pero además también cubrieron las zonas donde éstas se erosionaron por causa de los glaciares. El espesor de los depósitos de ceniza disminuye en dirección al sur conforme desaparece la presencia de volcanes que tuvieron actividad. Al sur de Azogues solo se encuentra ceniza en los páramos, mientras que la que se depositó en las cuencas más secas se han perdido por erosión. Los suelos de Zaruma son prueba de la gran extensión original de las cenizas.

En ciertos lugares de la Costa, como en Quinindé, los suelos desarrollados sobre cenizas recientes alcanzan espesores de alrededor de un metro, mientras las capas inferiores, formadas de cenizas antiguas, tienen aproximadamente 10 m de profundidad. Estos suelos se ubican en relieves ligeramente ondulados. Al Oeste, donde el relieve es más pronunciado, los suelos desarrollados a partir de las cenizas se han perdido por erosión y solo existen algunos vestigios en partes protegidas. La ceniza disminuye en dirección al Sur y en Balzar alcanza solamente un espesor aproximado de 30 cm.

En la vertiente Amazónica, la gran alteración de las cenizas debido al clima severo no permite diferenciar las cenizas antiguas de las recientes.

1.8.3. Suelos sobre rocas antiguas

Estos suelos cubren aproximadamente el 60-70 % del Ecuador continental y forman la mayor parte de la Amazonía peri-andina, la Costa y el tercio meridional de la Sierra. Entre las rocas antiguas se encuentran rocas bastante diferentes clasificadas como sedimentarias, metamórficas y eruptivas. La variedad de suelos desarrollados sobre rocas antiguas se explica por la diversidad de las condiciones pedogenéticas, producto de los diferentes climas, roca madre y condiciones topográficas. El clima, con las variaciones de temperatura y precipitación debidas a la altitud, es el principal factor que promovió la presencia de la diversidad de suelos de estas regiones del país.

1.9. Referencias Bibliográficas

- Acosta Solís, M. 1965. Los recursos naturales del Ecuador y su conservación. 1era. parte. Imprenta Popular. Mexico D.F., Mexico.
- Acosta Solís, M. 1977. Ecología y fitoecología. Editorial Casa de la Cultura Ecuatoriana. Quito, Ecuador.
- Apsden, J., M. Litherland y H. Salazar. 1988. Caracterización ambiental de la cuenca del río Paute. Estudio de Impacto Ambiental Definitivo Ex - post de la Subestación Eléctrica Cuenca. INECEL. Cuenca, Ecuador.
- ARCONEL. 2019. Balance nacional de energía eléctrica. Agencia de Regulación y Control de Electricidad. ARCONEL. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2FysWKM>
- Bornemiza, E. y A. Alvarado (ed). 1974. Manejo del suelo en América tropical. University Consortium on Soils of the Tropics, Centro Internacional de Agricultura Tropical, US Agency for International Development, Sociedad Colombia de la Ciencia del Suelo, Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo. Cali, Colombia. . <http://bit.ly/36wEASm>
- Cañadas, L. 1983. El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. Editores Asociados. Quito, Ecuador.
- CLIRSEN. 1979. Evaluación preliminar de la información recopilada sobre los recursos edafológicos. CLIRSEN. Quito - Ecuador.
- Collot, J., F. Michaud, A. Alvarado, B. Marcaillou, M. Sosson, G. Ratzov, *et al.* 2009. Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia: implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie. En: Comisión Nacional del Derecho del Mar (CNDM) (ed). Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador desde la costa continental hasta las islas Galápagos. CNDM-IRD-INOCAR. Guayaquil, Ecuador. <http://bit.ly/2mnFmii>
- Dahlgren, R., M. Saigusa and F. Ugolini. 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy* 82: 113-182.
- FLACSO, MAE y PNUMA. 2008. Geo Ecuador 2008: Informe sobre el estado del medio ambiente. FLACSO - MAE - PNUMA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/37K2WYX>
- Frei, E. 1958. Eine studie über den Zusammenhang zwischen Bodentyp, Klima und Vegetation in Ecuador. *Plant and Soil* 9(3): 215-236. <https://doi.org/10.1007/bf01394152>
- Gardi, C., M. Angelini, S. Barceló, J. Comerma, C. Cruz Gaistardo, A. Encina Rojas, *et al.* (ed). 2014. Atlas de Suelos de América Latina y El Caribe. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. Luxembourg. <http://bit.ly/2ut6OPJ>
- González, A. 2015. Apuntes personales. Quito, Ecuador.
- González, A., F. Maldonado y L. Mejía. 1986. Memoria Explicativa Mapa Suelos del Ecuador. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador.

- Huttel, C. 1997. Las grandes regiones climáticas y sus formaciones vegetales naturales En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebronski y M. Sourdats (eds). Paisajes naturales del Ecuador: las condiciones generales del medio natural. CEDIG - IPGH - IRD - IGM. Quito. <https://bit.ly/2m3acfj>
- Huttel, C., C. Zebronski, P. Gondard y J. Bourliaud. 1999. Paisajes agrarios de Ecuador. IFEA-IGM- IPGH-IRD-PUCE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kozCEl>
- IGM. 2013. Atlas geográfico de la República del Ecuador. IGM-SENPLADES. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2W9Wnug>
- IGM. 2019. Geovisualizador Instituto Geográfico Militar. Mosaico de Geopedología 1:25.000. Disponible en <https://bit.ly/2lTzM6Z>
- IRD. 2019. Sphaera: Les cartes produites par l'IRD:Équateur. Institut de Recherche pour le Développement. IRD. Marseille, France. <http://bit.ly/2ZTGIB7>
- León, J. 2010. Manual de geografía del Ecuador. Universidad Andina Simón Bolívar, sede Ecuador - Corporación Editora Nacional. Quito Ecuador.
- MAG. 2019. Geoportal del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Disponible en <http://bit.ly/2umR2WI>
- Marocco, R. y T. Winter. 1997. Bosquejo de la evolución geodinámica del Ecuador. En: A. Winckell, C. Zebronski y M. Sourdats (eds). Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural. CEDIG-IPGH-IRD-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/37J7Sgv>
- Mejía, L. 1997. Suelos del Ecuador: Reconocimiento general en base a su capacidad-fertilidad y mapageneral de clasificación por Capacidad-Fertilidad de los suelos del Ecuador: Una interpretación básica sobre las características de los suelos del Ecuador. FFJMD-INPOFOS-IGM-IPGH-SECS. Quito, Ecuador.
- Miller, E. 1959. Agricultural Ecuador. Geographical Review 49(2): 183-207. <https://doi.org/10.2307/211984>
- Naranjo, P. 1981. El clima del Ecuador Editorial Casa de la Cultura Ecuatoriana. Quito, Ecuador.
- Ortiz, S., V. Loayza y G. Albán. 2010. Gestión de datos edáficos en la cuenca baja del río Guayas con la implementación de un Sistema de Administración de Geoinformación -SAG. En: J. Espinosa (ed). XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo: El suelo como factor de mitigación del cambio climático. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, Ecuador. <http://bit.ly/36nEZ9A>
- Pacheco, R. 2009. El Ecuador: Recursos naturales agrícolas y del medio ambiente. Imprenta Colón. Quito, Ecuador.
- Parfitt, R. and B. Clayden. 1991. Andisols—the development of a new order in soil taxonomy. Geoderma 49(3-4): 181-198. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90075-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90075-5)
- Patzelt, E. y M. Echeverría. 1985. Flora del Ecuador. Banco Central del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Portais, M. 1997. Un ejemplo de geografía aplicada: el inventario de los recursos naturales renovables y la regionalización de la planificación agrícola en Ecuador. Revista Geográfica 9: 19-25.
- Pourrut, P. 1983. Climas del Ecuador. Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/35zG10P>
- Pourrut, P. 1997. Características hidrográficas e hidrológicas de los grandes ámbitos morfoclimáticos del Ecuador. En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebronski y M. Sourdats (eds). Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural. CEDIG-PGH-IRD. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/307bQgn>
- Sarmiento, G. 1987. Los principales gradientes ecoclimáticos en los Andes tropicales. In: IV Congreso Latinoamericano de Botánica. Medellín, Colombia.

- Shoji, S., M. Nanzyo and R. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. Amsterdam. Elsevier Science Publishers. The Netherlands. <http://bit.ly/37KSKzr>
- Soil Survey Staff. 1975. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agricultural Handbook N° 436. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture. Washington DC, USA. <http://bit.ly/2T163rd>
- Soil Survey Staff. 1990. Keys to soil taxonomy. SMSS Technical Monograph N° 6. Fourth ed. Virginia Polytechnic Institute. Blacksburg, USA. <http://bit.ly/36vj6oT>
- Takahashi, T. and S. Shoji. 2002. Distribution and classification of volcanic ash soils. Global Environmental Research 6(2): 83-98. <https://go.nasa.gov/2T114Hd>
- Winckell, A. 1997. Los paisajes de las Islas Galápagos. En: A. Winckell, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). Los paisajes naturales del Ecuador: Las regiones y paisajes del Ecuador. CEDIG-IPGH-IRD. Quito.
- Winckell, A., R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski, *et al.* (ed). 1997a. Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/39KCznr>
- Winckell, A., C. Zebrowski y M. Sourdat. 1997b. Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 2: Las regiones y paisajes del Ecuador. CEDIG-IPGH-IRD-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2moNqiM>
- Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (ed). 1997. Suelos volcánicos endurecidos. III Simposio Internacional UE-ORSTOM-PUCE-UCE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/34aWOqZ>
- Zebrowski, C. M. Sourdat. 1997. Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador. En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2kory6p>

CAPÍTULO 2

—SUELOS— DE LA COSTA

Julio Moreno, Instituto Geográfico Militar: vjmi76.jm@gmail.com

Gustavo Sevillano, Universidad Central del Ecuador: gfsevillano@uce.edu.ec

Omar Valverde, Universidad Politécnica de Madrid: omar.valverde@uom.es

Verónica Loayza, Ministerio de Agricultura y Ganadería: nloayzat@mag.gob.ec

Renato Haro, Consultor: renoharo@hotmail.com

Johanna Zambrano, Consultora: mjzambranob@gmail.com

David Reyes, University of Salzburg: mauriciodavidreyespozo@gmail.com

RESUMEN

La zona costera es una región con alto potencial agrícola. El 43 % de la tierra esta región es apto para uso agrícola debido a que presentan condiciones favorables para una amplia gama de cultivos tropicales como cacao, café, banano, palma africana, caña de azúcar, arroz, maíz, soya, yuca y numerosas frutas tropicales. Lo anterior se debe a la existencia, entre Quinindé y la frontera con Perú, de una llanura sumamente fértil que permite el desarrollo de agricultura altamente rentable y dentro de la cual se encuentran los únicos suelos de Ecuador sin limitaciones para la producción agrícola. Estos suelos están ubicados en la llanura con cobertura de proyecciones volcánicas, Andisoles en la zona húmeda y Mollisoles en la zona más seca, ocupando 1.3 millones de hectáreas. Existen varios paisajes en la Costa ecuatoriana que se caracterizan por tener condiciones similares de clima y material parental sobre los cuales se han desarrollado diferentes tipos de suelos, contribuyendo a la gran diversidad de suelos del país. El principal factor de formación del suelo en la Costa, además de los factores geológicos y topográficos, fue el clima, especialmente la precipitación. En general, los suelos de la Costa se pueden dividir en tres grandes grupos: a) suelos formados sobre rocas viejas (sedimentarias, metamórficas o ígneas) que comprenden la mayoría de los suelos de la parte occidental de la costa, particularmente aquellos desarrollados sobre rocas sedimentarias; b) suelos de la llanura costera antigua que recibieron deposiciones de ceniza volcánica, material sobre el cual se desarrollaron suelos de alto interés agronómico; y c) suelos desarrollados sobre materiales sedimentarios recientes agrupados en suelos del ambiente fluvio-marino localizados en las costas, fajas del litoral y manglares y los suelos que rodean los ríos que corresponden a casi todos los suelos aluviales de la región.

ABSTRACT

The coastal plain is a region with high agricultural potential, since 43 % of the land is suitable for production of a wide range of tropical crops such as cocoa, coffee, banana, oil palm, sugarcane, rice, corn, soybean, cassava, and numerous tropical fruits. The existence of a very fertile plain between Quinindé and the border with Peru allows the development of a highly profitable agriculture. Within this great plain are located the only Ecuadorian soils without limitations for agriculture; soils located on the old plain with volcanic protrusions, Andisols in the humid zone and Mollisols in the drier zone, occupying 1.3 million ha. There are several landscape units at the Ecuadorian coastal plain characterized for having similar climate and parent material conditions over which different soil types have developed contributing to the great diversity of the country soils. The main factor of soil formation on the Ecuadorian coastal plain, in addition to geological and topographical factors, was climate, especially precipitation. In general, there exist three broad set of conditions grouping the diversity of soils from this region: (a) Soils developed from old rocks (sedimentary, metamorphic, or igneous) comprising the majority of soils in the western part of the coastal plain, particularly those developed from sedimentary rocks; (b) Soils from the old coastal plain which received volcanic ash depositions, material over which soils of high agronomic interest were developed; and (c) Alluvial soils developed over recent sedimentary materials grouped into soils from the fluvial-marine environment located on the beaches, littoral stripes and mangroves, and soils from the river surroundings corresponding to almost all of the alluvial soils of the region.

2.1. Introducción

La zona costera, con excepción de la parte septentrional húmeda, es una región con alto potencial agrícola. Sin bien las fuertes pendientes de la cordillera costera constituyen limitaciones ciertas para los cultivos, la existencia de una llanura sumamente fértil entre Quinindé y la frontera con Perú permite el desarrollo de agricultura altamente rentable. Dentro de esta región se encuentran los únicos suelos de Ecuador sin limitaciones para la agricultura, suelos ubicados en la llanura con cobertura de proyecciones volcánicas (llanura antigua), Andisoles en la zona más húmeda y Mollisoles en la zona menos húmeda, ocupando 1.3 millones de ha (20 % de área de la Costa) (Huttel, *et al.*, 1999).

Por otro lado, la cartografía de aptitudes agrícolas, a escala 1: 200 000, generada por el PRONAREG-ORSTOM en 1982, demuestra que el 43 % de la tierra de la región Costa (2.8 millones de ha) es apta para uso agrícola. Estas son tierras ubicadas en zonas planas a ligeramente onduladas de condiciones favorables para una amplia gama de cultivos tropicales como cacao, café, banano, palma aceitera, caña de azúcar, arroz, maíz, soya, yuca y numerosas frutas tropicales. El 22 % (aproximadamente 1.4 millones de ha) tiene relieves ondulados y disectados, lo que hace que sean tierras marginales para uso agrícola, pero que pueden utilizarse para ganadería con pastos naturales y cultivados. Finalmente, el 35 % de la Costa (2.4 millones de ha) corresponde a áreas que tienen pendientes muy pronunciadas y otras limitaciones morfopedológicas, por lo que solamente se recomienda el uso forestal con fines de producción y/o protección (Pacheco, 2009).

En la región de la Costa existe una variedad de paisajes caracterizados por condiciones similares de clima y material parental en los cuales se han desarrollado diferentes tipos de suelos que contribuyen a la gran diversidad de los suelos de Ecuador (**Figura 2.1**). El principal factor de deformación de los suelos en la Costa ecuatoriana, además de los factores geológico y topográfico, es el clima, sobre todo la precipitación, ya que la temperatura tiende a ser isohipertérmica en toda la Costa. En general, existen tres grandes conjuntos que agrupan a los diversos suelos de la región.

2.1.1. Suelos desarrollados sobre rocas antiguas

Los suelos desarrollados sobre rocas antiguas (metamórficas, sedimentarias o eruptivas) constituyen la mayor parte de los suelos de la parte occidental de la Costa, sobre todo aquellos desarrollados de rocas sedimentarias. La variedad de suelos formados sobre rocas antiguas se explica por las diferentes condiciones pedogenéticas como la diversidad de clima, roca madre y relieve. De estas condiciones, la precipitación fue quizá el factor más importante en el desarrollo de estos suelos, por ejemplo, el pH, la CIC y la suma de bases disminuyen a medida que aumentan las precipitaciones en suelos desarrollados sobre rocas sedimentarias muy parecidas y en posiciones topográficas similares (Moreno, 2012). Dentro de los suelos desarrollados sobre rocas antiguas se pueden identificar los siguientes grupos (Huttel, *et al.*, 1999): a) suelos poco evolucionados, de escaso espesor localizados en zonas de fuerte pendiente, por ejemplo, en las cordilleras costeras donde la erosión impide la formación de suelos más profundos; b) suelos vérticos de pH > 7 característicos de las zonas secas y áridas de la región costera (por ejemplo la península de Santa Elena), desarrollados principalmente sobre rocas sedimentarias antiguas como arcillas y areniscas; c) suelos pardos (Mollisoles) y vérticos (Vertisoles) de pH < 7 localizados en la parte húmeda de la cordillera costera de Chongón Colonche (suroeste de la Costa), los pardos están localizados en las pendientes fuertes y los vérticos en los relieves menos pronunciados; y d) suelos ferralíticos rojos altamente desaturados con un pH muy ácido y toxicidad de aluminio presentes en las regiones más húmedas de las colinas del norte de la provincia de Esmeraldas.

2.1.2. Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas

Partes de la llanura costera antigua recibieron deposiciones de ceniza volcánica, material sobre el cual se desarrollaron suelos de alto interés agronómico. La variedad de climas bajo los que se meteorizaron las

cenizas es, en gran parte, responsable de la diversidad de las características de estos suelos. En el sector de Quinindé, los suelos desarrollados sobre cenizas recientes tienen un espesor de alrededor de un metro, pero se encuentran sobre otra capa de suelos de 10 m de espesor desarrollada sobre cenizas antiguas. El espesor de los suelos de ceniza reciente se reduce a medida que los sitios se alejan de la cordillera y se desplazan hacia el sur, alcanzando solamente 30 cm al norte de Balzar. Las partículas finas de ceniza fueron empujadas por el viento a distancias considerables de los centros de emisión, por lo que la meteorización fue rápida, resultando en perfiles de suelos homogéneos, limosos y de color pardo. Las precipitaciones, y sobre todo la duración de la estación seca, desempeñaron un papel primordial en el desarrollo de algunas de las características de estos suelos, por ejemplo, en las zonas más húmedas (menos de 4 meses secos al año) la pedogénesis promovió la formación de arcillas amorfas (alofana e imogolita), mientras que en las regiones con estación seca bien marcada (más de 4 meses secos al año) predominó la síntesis de minerales arcillosos cristalinos (arcillas 2:1) (Zebrowski y Sourdats, 1997; Huttel, *et al.*, 1999).

2.1.3. Suelos aluviales formados sobre materiales sedimentarios recientes

Los suelos formados sobre materiales sedimentarios recientes se agrupan en: a) suelos del medio fluvio-marino, que están localizados en las playas, cordones litorales y manglares y; b) suelos del medio fluvial que corresponden a casi la totalidad de los suelos aluviales de la región costanera. En los suelos del medio fluvial la textura y el grado de saturación de bases permiten distinguir varios conjuntos, generalmente de buena fertilidad y fácilmente cultivables, pero que pueden presentar las siguientes características desfavorables: a) textura arenosa o existencia de piedras en la parte alta (aguas arriba) de las zonas de esparcimiento; b) exceso de agua y la consecuente presencia de suelos hidromórficos en las zonas hiperhúmedas de Esmeraldas, lo que hace difícil e incluso imposible la actividad agrícola, en particular en sitios donde la capa freática asciende hasta la superficie y; c) textura arcillosa, característica de los suelos de la llanura reciente, que limita el drenaje y favorece las inundaciones en la estación lluviosa, pero que son suelos ideales para el cultivo de arroz (Zebrowski y Sourdats, 1997; Huttel, *et al.*, 1999; Moreno, 2001).

2.2. Paisajes de la Costa

La variedad de paisajes característicos de la Costa de Ecuador se muestra en la **Figura 2.1** y una discusión detallada de estos paisajes se presenta a continuación.

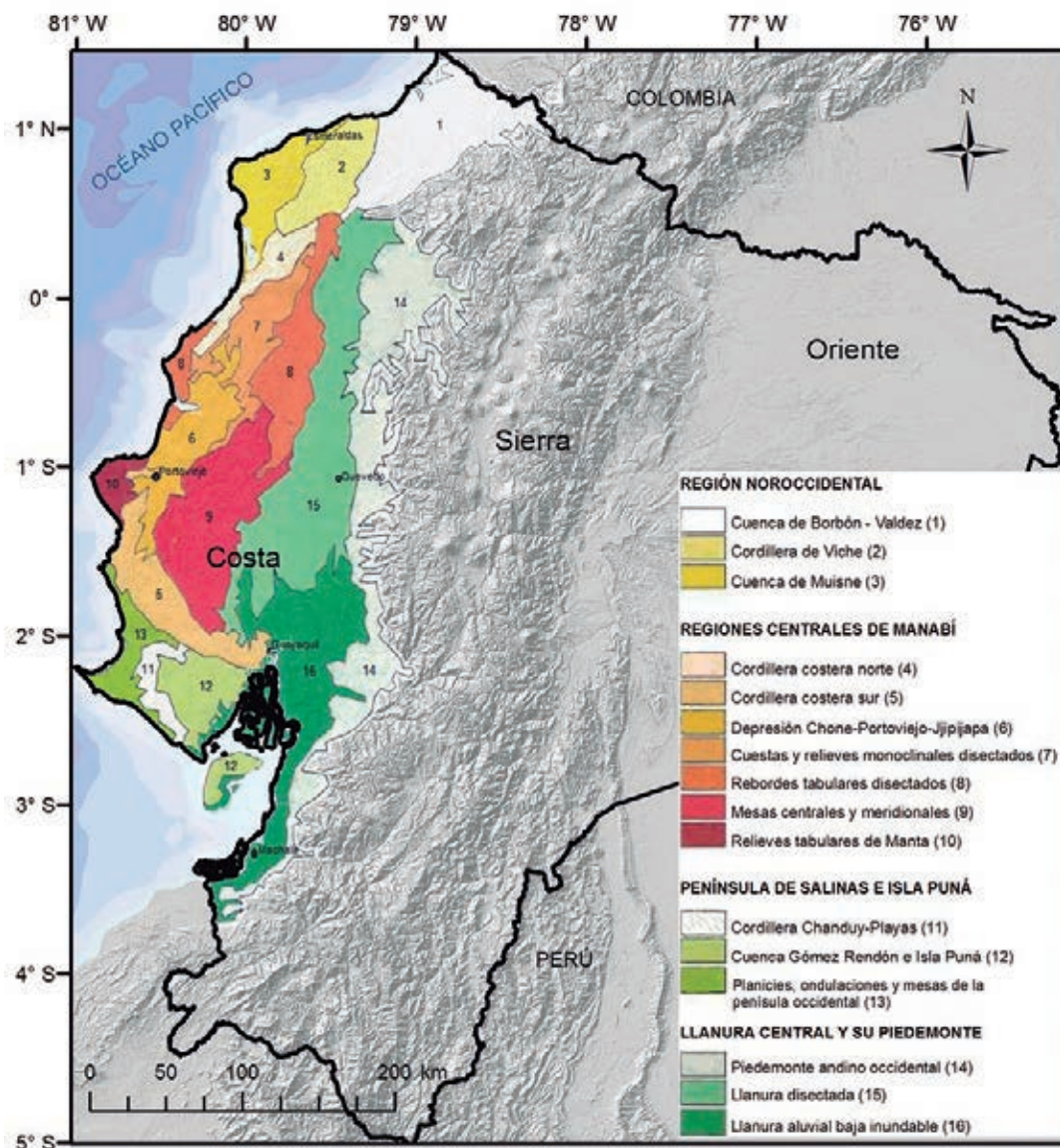


Figura 2.1. Ubicación de los diferentes paisajes costeros con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell y Zebrowski (1997).

2.2.1. Gran cono tabular cubierto totalmente de cenizas volcánicas

Esta zona está ubicada al este de la cuenca Borbón Valdez en la provincia de Esmeraldas (**Figura 2.1**). El contacto entre los relieves andinos y los costaneros se produce, generalmente, por medio de una gran vertiente abrupta, pero, en este caso, la vertiente se ha atenuado en la zona noroccidental por la existencia de un relieve tabular, ligeramente inclinado hacia el noroeste, que culmina en los 750 m s. n. m. en Alto Tambo, San Lorenzo (**Figura 2.2**). Este relieve se formó de antiguos conos de esparcimiento coalescentes establecidos en la desembocadura de los ríos Mira, Lita y Gualpi, cauces que tienen régimen torrencial y que drenan la cuenca interandina. El área está compuesta por depósitos dedríticos y torrenciales gruesos (aproximadamente 600 m de espesor), que fueron cubiertos por proyecciones de erupciones volcánicas recientes, posiblemente provenientes de volcanes ubicados en Colombia. Estos materiales sometidos a un clima cálido e hiperhúmedo (4 000 a 6 000 mm lluvia/año y temperaturas > a 25 °C) dieron lugar a suelos de origen volcánico perhidratados (con capacidad de retención de agua superior al 100 %), relativamente arenosos en la parte alta del cono y más limosos en la parte baja (Winckell y Zebrowski, 1997).

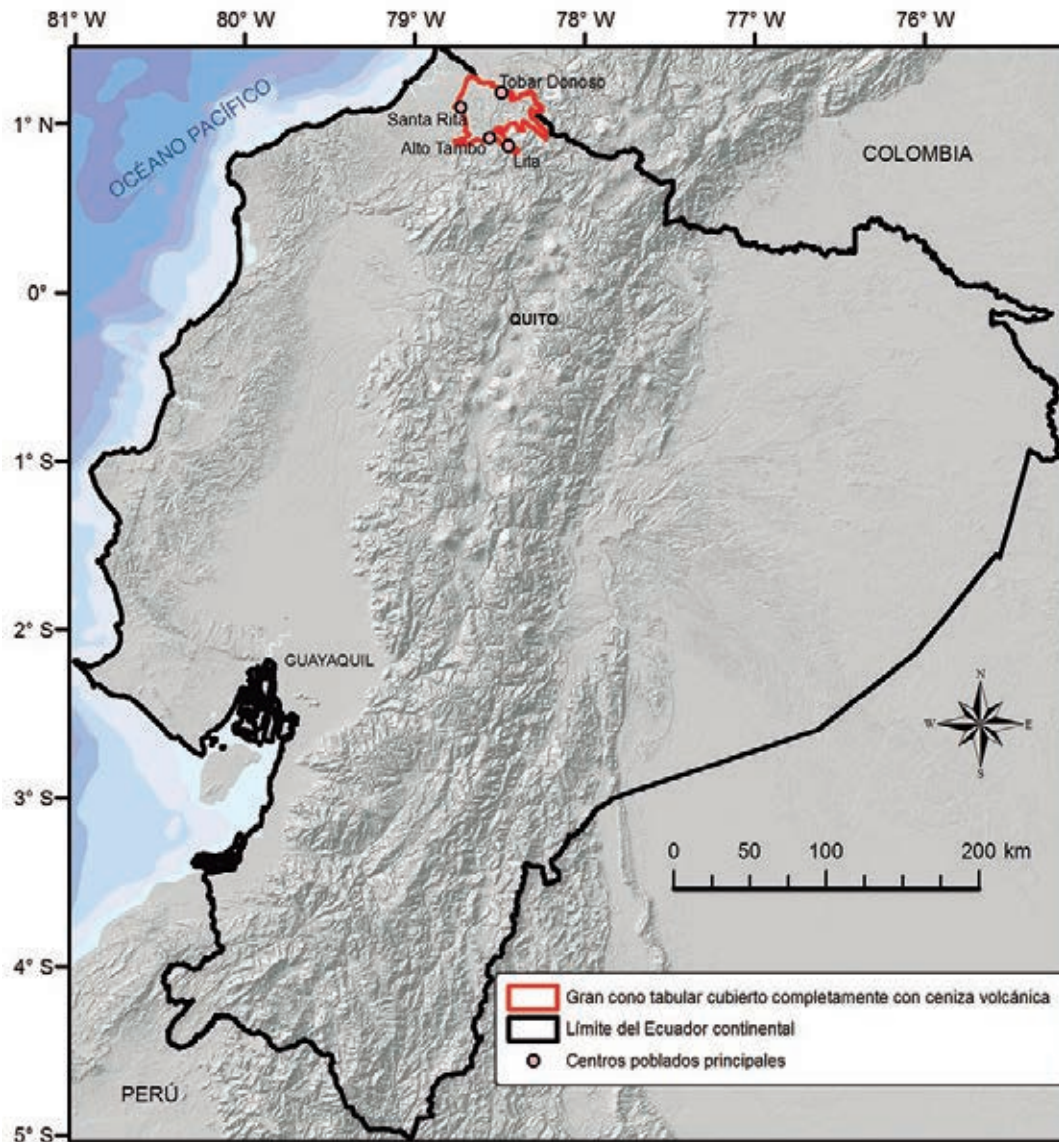


Figura 2.2. Ubicación del gran cono tabular cubierto totalmente con cenizas volcánicas con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell and Zebrowski (1997).

2.2.1.1. Superficies cercanas a las vertientes andinas

Este paisaje integra las superficies cimaras (b) y los abruptos circundantes (c) mostrados en la **Figura 2.3**. El nivel cimero tiene el aspecto de una superficie muy regular, moderadamente disectada en pequeñas cimas redondeadas biconvexas, que culmina en el poblado de Alto Tambo, en la salida de la garganta del río Lita. Esta plataforma alcanza alturas superiores a los 800 m s. n. m. en la desembocadura del río Mira en el río Lita. Estos conos se unen luego hacia el este permitiendo que la superficie de las cimas se ensanche rápidamente. Los Andisoles perhidratados de esta zona tienen un espesor que disminuye regularmente del sureste hacia el noreste. Sobre los abruptos, los suelos son erosionados y coluvionados, por lo que los suelos de origen volcánico colindan con suelos arcillosos, poco profundos y muchas veces pedregosos (Winckell y Zebrowski, 1997).

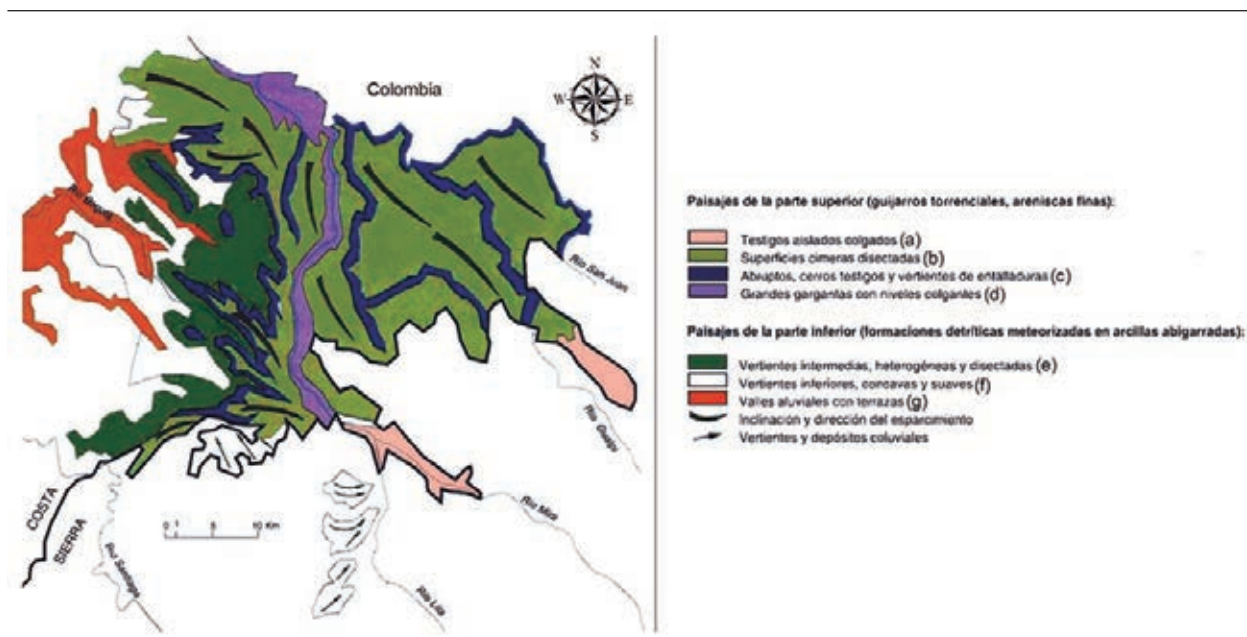


Figura 2.3. Gran cono tabular de esparcimiento disectado (Winckell y Zebrowski, 1997).

En esta zona también existen pequeñas superficies que son testigos de depósitos escalonados que van más arriba de los conos, por lo general encaramados sobre las faldas de las quebradas de los causes actuales de los ríos [(a) en Figura 2.3]. Su posición, hacia el interior de la vertiente andina, favoreció la acumulación de una cobertura importante de cenizas volcánicas sobre las cuales se desarrollaron Andisoles perhidratados que alcanzan profundidades de 2 a 3 m (Winckell y Zebrowski, 1997).

Los suelos representativos de esta unidad son Hydrudands (Soil Survey Staff, 2006), con apreciable contenido de arcillas amorfas, baja densidad aparente ($< 0.9 \text{ g cm}^{-3}$), alta fijación de fósforo (P) y de textura franco limosa (untuosos al tacto). Presentan una muy fuerte reacción al fluoruro de sodio (NaF) en todo el perfil, debido al alto contenido de arcillas amorfas. La cantidad de agua in situ, cercanas a las que se obtienen a pF3 en suelo húmedo, siempre son muy elevadas, generalmente superiores al 200 %, alcanzando a veces 300 %. El pH del horizonte superficial es bajo (4.6), pero aumenta a profundidad siendo ligeramente inferior a 6 en todo el resto del perfil. La cantidad de bases intercambiables es muy baja ($\leq 0.3 \text{ cmol kg}^{-1}$), así como la saturación de bases ($\leq 1 \%$) (Zebrowski y Sourdat, 1997).

2.2.1.2. Superficies onduladas

Al pie del abrupto cimero se extiende un conjunto complejo de colinas y vertientes moderadas [(e) y (f) en la Figura 2.3], esencialmente presentes en la parte occidental del cono (la más erosionada), desarrollado sobre depósitos relativamente homogéneos de areniscas y conglomerados altamente meteorizados que han formado arcillas abigarradas y guijarros. Estas colinas y vertientes presentan, por un lado, facies menos torrenciales y, por otro lado, facies con un estado de alteración mucho más avanzado que solo pueden explicarse por la edad más antigua de los depósitos inferiores en relación con los depósitos superiores y por las condiciones climáticas más húmedas. La parte superior de estas vertientes, ubicada al pie de la cornisa somital, presenta pendientes entre moderadas y fuertes (rectilíneas y convexas) que están disectadas por numerosos torrentes paralelos. Las partes inferiores de las vertientes, o aquellas situadas adelante de éstas, contienen modelados suaves, con pendientes cóncavas y ligeramente prolongadas por los relieves subyacentes (Winckell y Zebrowski, 1997). La cobertura de cenizas de poco espesor ha sido parcialmente retirada por la erosión. En consecuencia, los Andisoles perhidratados limosos colindan con los suelos ferralíticos y seudoferralíticos amarillos muy desaturados (Zebrowski y Sourdat, 1997). Estos suelos ferralíticos (Figura 2.4), franco arcillosos y con bajo contenido de materia orgánica, están

compuestos por caolinita, huellas de gibsita, óxidos de hierro y de cuarzo en estado fino, baja CIC ($< 10 \text{ cmol kg}^{-1}$), pH fuertemente ácido (4.1 a 4.6), altamente desaturados y excesivamente ricos en aluminio intercambiable (Zebrowski y Sourdat, 1997).



Figura 2.4. Perfil de un suelo ferralítico (izquierda), ubicado en la zona de San Lorenzo, Esmeraldas, donde se cultiva palma aceitera (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2015).

2.2.2. Relieves estructurales sobre sedimentos terciarios

Estos relieves se ubican dentro de las regiones costaneras de Manabí y Esmeraldas (**Figura 2.5**), pero aproximadamente la mitad de esta zona está ubicada en el centro y el sur de la provincia de Manabí donde forman parte de los paisajes característicos de la región. La altitud con respecto a las superficies cimera tabulares varía entre 450-500 m en el centro y entre 250-300 m hacia el exterior. La totalidad de estos paisajes pertenece a un solo tipo de relieve desarrollado sobre una misma asociación de formaciones geológicas caracterizadas por una capa cimera dura sobre una capa inferior blanda, es decir, un basamento de arcillas y de limolitas (Formación Onzole) coronado por un conjunto de sedimentos detríticos de areniscas, arenas y conglomerados (Formación Borbón) (Winckell y Zebrowski, 1997; Alto y Miller, 1999; Ramírez, 2013). Con respecto al clima, estos relieves estructurales, principalmente en la zona central y meridional de Manabí, se caracterizan por recibir precipitaciones medias anuales superiores a los 1 000 mm, llegando hasta 1 500 mm sobre las superficies de las mesas. Las temperaturas medias anuales son superiores a 25 °C (Winckell y Zebrowski, 1997).

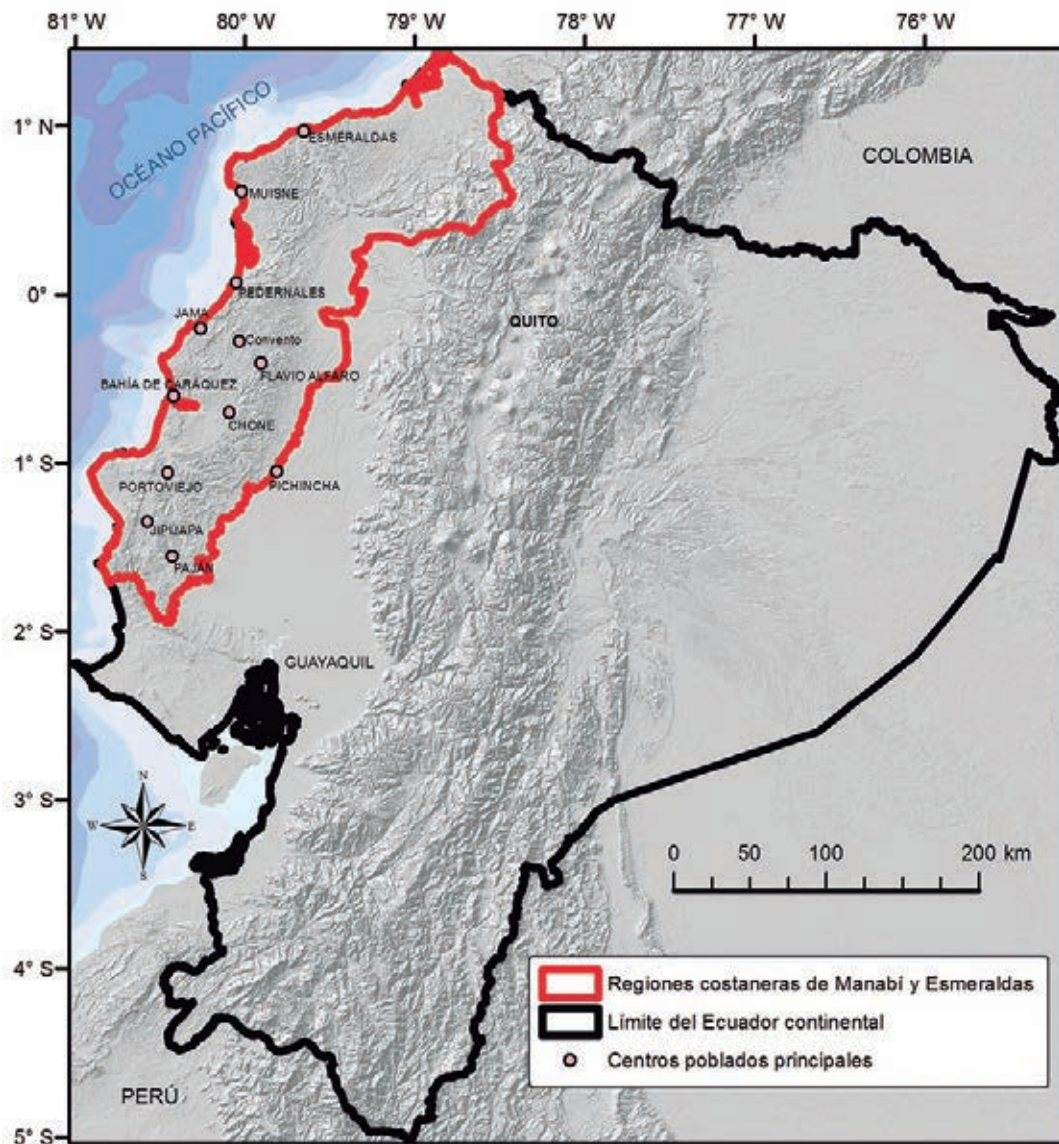


Figura 2.5. Ubicación de las regiones costaneras de Manabí (centro y sur) y Esmeraldas (norte) con respecto al Ecuador continental donde están localizados los relieves estructurales sobre sedimentos terciarios.

La distribución de los pisos altitudinales de los relieves estructurales que se presenta en la **Figura 2.6** describe sus componentes como: a) superficies cimaras de mesa en la parte superior con pendientes suaves y suelos desarrollados; b) vertientes circundantes (abruptos) con pendientes fuertes expuestas a procesos erosivos intensos, con suelos muy poco desarrollados; c) vertientes bajas con pendientes moderadas; y d) valles planos de origen aluvial con suelos más desarrollados en las áreas más altas y estables (terrazas medias y altas) y suelos muy poco desarrollados en áreas cercanas al cauce de los ríos (terrazas bajas) que están expuestas a inundaciones que originan nuevas deposiciones de origen fluvial que los rejuvenecen constantemente.

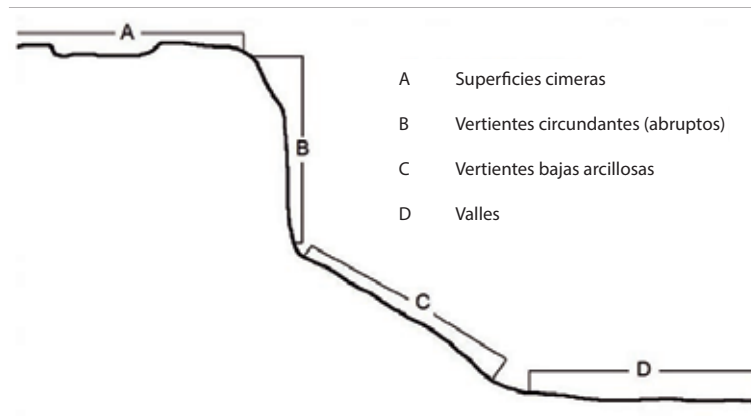


Figura 2.6. Distribución de los diferentes paisajes en los relieves estructurales desarrollados sobre sedimentos terciarios.

2.2.2.1. Mesas de arenisca

Las mesas de arenisca representan casi la totalidad de las superficies cimaras. Los suelos presentan caracteres móllicos, el epipedón es profundo, tiene > 50 % de saturación de bases y textura arcillosa a arcillo-limosa (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997). Como ejemplo se presenta el perfil de un suelo ubicado en la superficie cimera de mesa clasificado como Mollic Hapludalfs (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.7** y **Cuadro 2.1**) que tiene un epipedón de 13 cm, con textura franco arenosa en superficie y arcillosa a profundidad. Este suelo presenta un horizonte A de color negro y un horizonte Bt más claro a profundidad de consistencia muy dura que limita el paso de las raíces (CLIRSEN, *et al.*, 2010c).

Además de la superficie disectada de la mesa, en esta unidad también se presentan los abruptos areniscos del contorno, los cuales están asentados sobre los afloramientos detríticos cimentados de la formación Borbón que rodean al conjunto y que lo delimitan de las regiones circundantes. Los desniveles entre la superficie superior y los relieves bajos circundantes son, por lo general, de alrededor de 300 m y las pendientes casi siempre son superiores al 70 %, formando verdaderos acantilados rocosos. Los suelos en estos sitios, por las fuertes pendientes, están sometidos a severos procesos erosivos que vencen a los procesos de pedogénesis, por lo tanto, son suelos que se caracterizan por tener un perfil poco profundo, muchas veces inferior a 10 cm, debido al afloramiento frecuente de rocas del substrato (Zebrowski y Sourdat, 1997).



Figura 2.7. Perfil del suelo clasificado como Mollic Hapludalfs ubicado en El Cedro, Olmedo, Manabí, sobre la superficie disectada de una mesa de la formación Borbón (areniscas) en una pendiente < 25 % (CLIRSEN, *et al.*, 2010c).

Cuadro 2.1. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Mollic Hapludalfs (CLIRSEN, *et al.*, 2010c).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-13	Color en húmedo: negro (10YR 2/1); textura: franco arenosa; estructura: granular; pH: 6.4; materia orgánica: 4.6 %; CIC: 27 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 99 %.
Bt	13-43	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares, con pocos fragmentos gruesos tipo grava media; pH: 6.3 y materia orgánica: 4.6 %; CIC: 31 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
BC	43-76	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura: franco arcillo arenosa; estructura: bloques subangulares, con pocos fragmentos gruesos del tipo grava media; pH: 6.3; materia orgánica: 0.7 %; CIC: 31 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
C	76-128	Color en húmedo: pardo (7.5YR 4/2); textura: arcillosa; estructura: masiva.

Un perfil característico de un suelo de esta zona se presenta en la **Figura 2.8** y en la **Cuadro 2.2**. Este suelo está clasificado como Lithic Udorthents (Soil Survey Staff, 2006) y su perfil muestra muy poca o ninguna evidencia de formación de horizontes pedogenéticos (MIDENA, *et al.*, 2014).



Figura 2.8. Perfil del suelo clasificado como Lithic Udorthents ubicado en Chone, Manabí, sobre una cornisa de mesa (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2014).

Cuadro 2.2. Características del perfil del suelo clasificado como Lithic Udorthents (MIDENA, *et al.*, 2014).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-5	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franco arenosa; estructura: granular a bloques subangulares, con muchos fragmentos de grava fina; pH: 7.1; materia orgánica: 3.2 %; CIC: 24 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 67 %;
AC	5-25	Color en húmedo: pardo pálido (10YR 6/3); textura franco arcillosa; estructura: masiva, con abundancia de fragmentos gruesos tipo grava media; pH: 6.1; materia orgánica: 1.2 %; CIC: 15 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 83 %.
R	25-50	Color en húmedo: gris claro (5Y 7/2); roca.

2.2.2.2. Relieves arcillosos

Bajo el abrupto se extienden las vertientes arcillosas con pendientes moderadas (< 40 %) que bajan hasta los valles aluviales, en su mayoría localizados en posiciones inferiores a los 100 m s. n. m., llegando incluso hasta los 30-50 m s. n. m. Estas vertientes tienen relieves derivados de la Formación Onzole compuestos por una sedimentación relativamente homogénea de limolitas y areniscas finas poco cimentadas que contienen inserciones menores de arcillas y lutitas. Estas facies, sin coherencia primaria, son fácilmente alterables, aún bajo clima seco, siendo rocas blandas ubicadas bajo las capas duras de arenisca (Formación Borbón) de los relieves tabulares superiores que en pocas ocasiones sobrepasan los 200 m s. n. m. de altitud (Winckell y Zebrowski, 1997; Alto y Miller, 1999; Ministerio de Transporte y Obras Públicas and INECA, 2012).

Esta unidad, por estar ubicada por debajo de la influencia de las precipitaciones orográficas, soporta un clima caracterizado por tener una larga estación seca. Las alteraciones moderadas dieron lugar a la formación de suelos muy arcillosos, vérticos y saturados (Zebrowski y Sourdat, 1997). Como ejemplo de esta unidad se presenta el perfil de un suelo clasificado como Vertic Haplustepts (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.9** y **Cuadro 2.3**) que muestra un desarrollo pedogenético incipiente y características vérticas. El régimen de humedad es ústico, es decir, el perfil se encuentra seco por 90 días acumulativos o más en años normales (Soil Survey Staff, 2006).



Figura 2.9. Perfil del suelo clasificado como Vertic Haplustepts (izquierda) ubicado Pechiche, 24 de Mayo, Manabí, sobre una vertiente de mesa de la Formación Onzole (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2010h).

Cuadro 2.3. Características del perfil del suelo clasificado como Vertic Haplustepts (CLIRSEN, *et al.*, 2010h).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-8	Color en húmedo: rojo opaco (10R 3/2); textura: franco arcilloso; estructura: granular a bloques subangulares; pH: 7.4; materia orgánica: 2.4 %; CIC: 31 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 96 %.
A	8-24	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: franco arcillo limoso; estructura: bloques subangulares.
Bw	24-40	Color en húmedo: pardo oliva (2.5Y 4/3); textura: franco arcillo limoso; estructura: bloques subangulares, con abundancia de fragmentos de tipo grava fina; pH: 6.4; materia orgánica: 1.0 %; CIC: 30 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 95 %.
C	40-55	Color en húmedo: amarillo oliva (5Y 6/6); textura: franco arcillo limoso; estructura: masiva, con muchos fragmentos gruesos tipo grava fina; pH: 6.4 y materia orgánica: 0.6 %.
CR	55-110	Color en húmedo: amarillo oliva (2.5Y 6/6); textura: arcilloso; estructura: masiva, con abundantes fragmentos del tipo grava gruesa.

2.2.2.3. Medio aluvial

En la depresión Chone-Portoviejo se encuentran dos de los más grandes valles de la Costa ubicados en el río Chone al norte y en el río Portoviejo al sur, ambos compuestos por terrazas planas altas y bajas. Las terrazas altas se ubican entre 6 y 10 m por encima del curso actual del río y sus suelos son básicos, vérticos, limo-arcillosos a arcillosos. Las terrazas bajas, sujetas a inundaciones anuales, se ubican de 1 a 5 m sobre el nivel de las aguas y presentan suelos limo-arenosos a limosos poco evolucionados (Winckell y Zebrowski, 1997).

Esta diferenciación se debe a que los suelos que se encuentran en las terrazas bajas, ubicadas cerca de los cauces actuales, se rejuvenecen constantemente por nuevos aportes de material sedimentario transportados por las crecientes anuales de los ríos durante los periodos de lluvias. Las terrazas medias y altas, planas al igual que las anteriores (< 5 % de pendiente), no están expuestas a nuevos aportes de material aluvial por estar ubicadas en niveles escalonados más altos con respecto al cauce de los ríos y, por esta razón, tuvieron la estabilidad necesaria para desarrollar suelos muy fértiles, de condiciones físicas y químicas adecuadas, donde se asienta la agricultura de la región. Además, por su cercanía a los ríos, estos suelos tienen mayor humedad en los periodos secos o es factible la utilización de riego.

Como ejemplo de este tipo de suelos aluviales se presenta el perfil de un suelo clasificado como Fluventic Eutrudepts (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.10** y **Cuadro 2.4**), caracterizado por tener texturas francas y buen drenaje natural. La profundidad efectiva es de 52 cm y la secuencia de horizontes es del tipo Ap/Bw/C1/C2/2Ab. El régimen de humedad údico indica que todo el perfil no está seco más de tres meses acumulativos en la mayoría de los años (Soil Survey Staff, 2006).



Figura 2.10. Perfil del suelo clasificado como Fluventic Eutrudepts (izquierda) ubicado en Boquerón, Olmedo, Manabí, sobre una terraza media sobre la cual se ha sembrado guanábana (*Annona muricata*) (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2010d).

Cuadro 2.4. Características del perfil del suelo clasificado como Fluventic Eutrudepts (CLIRSEN, *et al.*, 2010d).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-12	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: franca; estructura: granular; pH: 6.1; materia orgánica: 3.8 %; CIC: 25 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 93 %.
Bw	12-52	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura: franca; estructura: bloques subangulares; pH: 6.1; materia orgánica: 1.3 %; CIC: 26 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 97 %.
C1	52-89	Color en húmedo: pardo oliva (2.5Y 4/4); textura: franco arenosa; estructura: masiva; pH: 6.1; materia orgánica: 0.8 %.
C2	89-120	Color en húmedo: pardo oliva claro (2.5Y 6/3); textura: franca; estructura: masiva, con muchos fragmentos gruesos tipo grava fina; pH: 6.3; materia orgánica: 0.9 %.
2Ab	120-140	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.3; materia orgánica: 0.9 %.

2.2.3. Gran cono tabular de Santo Domingo

El gran cono tabular de Santo Domingo (**Figura 2.11**) está formado por los depósitos provenientes del aporte de los principales ríos del norte de la Sierra. Las evidencias encontradas, como la amplitud de la sedimentación y del encajonamiento posterior (400 m en Mindo) demuestran que se trata de depósitos antiguos, provenientes de ríos de mayor capacidad y competencia de la que tiene la red fluvial actual y que están relacionados con uno o varios periodos de deshielo glaciario y con el aumento consecutivo del escurrimiento hídrico fluvial ocurrido por el deshielo del casquete glaciario andino. Asimismo, es evidente la relación con la enorme cantidad de material depositado (ceniza volcánica) por la fuerte actividad volcánica andina (Winckell, *et al.*, 1997).

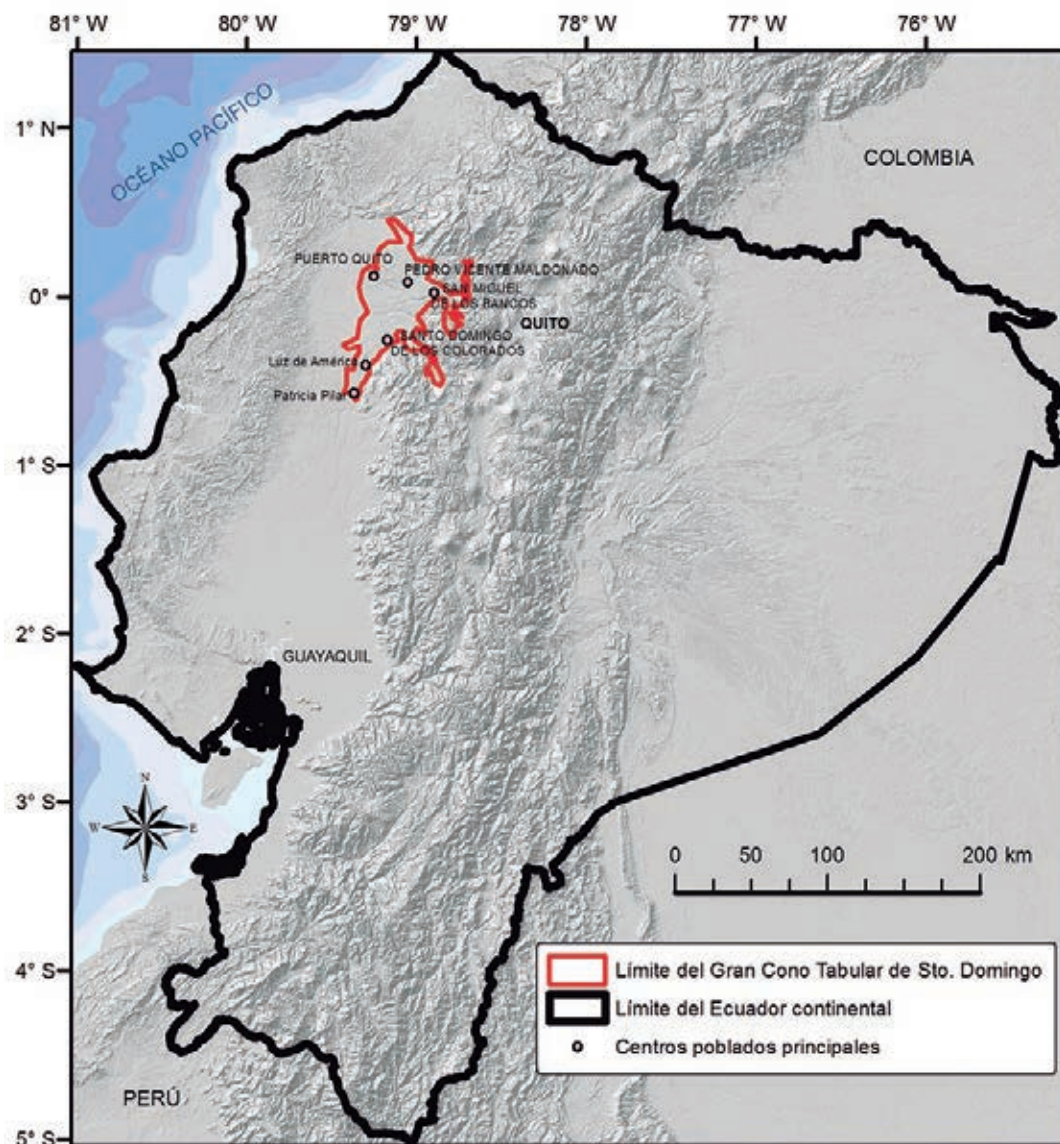


Figura 2.11. Ubicación del Gran Cono Tabular de Santo Domingo con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell, *et al.* (1997).

Este gran cono, ubicado en una zona tropical húmeda, recibe en promedio $> 2\,500$ mm anuales de precipitación y tiene una temperatura media anual > 22 °C, generando un régimen de humedad údico y hasta perúdico y un régimen isohipertérmico de temperatura del suelo. Todos los suelos son derivados de cenizas volcánicas, consecuencia de la cercanía a los centros de emisión. La ceniza cubrió todo el relieve sin importar la pendiente. Bajo estas condiciones climáticas, la alteración de las cenizas volcánicas promovió la formación de arcillas amorfas (alofana e imogolita) de baja saturación de bases (Winckell, *et al.*, 1997).

2.2.3.1. Superficies cercanas a las vertientes occidentales de la cordillera

Esta zona está ubicada en la parte alta del cono, junto a la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, sitio donde se encuentran los depósitos aluviales en posición encaramada a lo largo de las entalladuras actuales promovidas por el encajonamiento posterior de la red hidrográfica. Estas condiciones han promovido la formación de una asociación de superficies disectadas-entalladas, en cuyas vertientes exteriores muy abruptas aparecen afloramientos pedregosos y conglomeráticos (Winckell, *et al.*, 1997).

El perfil modal de esta unidad corresponde a un suelo clasificado como Thaptic Hapludands (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.12** y **Cuadro 2.5**) caracterizado por poseer colores muy oscuros en el primer horizonte y fuerte reacción al NaF en la mayoría de sus horizontes.



Figura 2.12. Perfil del suelo clasificado como Thaptic Hapludands (izquierda) ubicado en Pachijal, Nanegalito, Pichincha. El sitio está en la parte alta del cono cercana a la cordillera occidental. En estos sitios se desarrollan sistemas silvopastoriles con ganadería de doble propósito (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013g).

Cuadro 2.5. Características del perfil del suelo clasificado como Thaptic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013g).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-6	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; densidad aparente: 1.24 g cm ⁻³ .
AC	6-24	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: areno francosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 5.6; materia orgánica: 4.5 %.
2Ab1	24-41	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura: areno francosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 5.9; materia orgánica: 6.5 %; CIC: 14 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 34 %.
2Ab2	41-70	Color en húmedo: negro (10YR 2/1); textura de campo: franca; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF.
2C1	70-78	Color en húmedo: gris muy oscuro (10YR 2/1); textura de campo: arena; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF.
3C2	78-105	Color en húmedo: gris muy oscuro (10YR 2/1); textura de campo: franco arenosa; estructura: masiva, porosa; fuerte reacción al NaF.

2.2.3.2. Superficies centrales y occidentales del cono

Estos paisajes representan a una estrecha asociación de superficies disectadas, ubicadas principalmente en la parte central y occidental del gran cono tabular de Santo Domingo. El perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (Soil Survey Staff, 2006) es representativo de las condiciones de la zona (**Figura**

2.13 y Cuadro 2.6). Este suelo tiene una textura franco arenosa en los primeros 50 cm, morfológicamente es un perfil del tipo Ap/AB/Bw/C1/C2 y todos los horizontes presentan fuerte reacción al NaF. El horizonte A es de color pardo muy oscuro, de estructura granular a bloques subangulares. Subyace al horizonte A un horizonte Bw de color pardo oscuro y de estructura en bloques subangulares. Los dos horizontes C son de colores de pardo amarillentos a grises oscuros con estructuras masivas.



Figura 2.13. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (izquierda) ubicado en Los Laureles, Pedro Vicente Maldonado, Pichincha, en la parte central del Cono Tabular. Estos sitios son utilizados con sistemas agrosilvopastoriles para ganado de doble propósito (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013h).

Cuadro 2.6. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013h).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-10	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; densidad aparente: 0.96 g cm ⁻³ ; pH: 5.9; materia orgánica: 10.0 %; CIC: 14 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 13 %.
A	10-25	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 5.8; materia orgánica: 4.3 %; CIC: 14 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 11 %.
Bw	25-55	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.0; materia orgánica: 3.8 %.
C1	55-75	Color en húmedo: gris (10YR 5/1); textura de campo: areno francosa; estructura: masiva; fuerte reacción al NaF.
C2	75-105	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura de campo: franco arenosa; estructura: masiva; fuerte reacción al NaF.

2.2.4. Llanura antigua de deposición (llanura costera alta)

La llanura antigua de deposición está conformada por relieves entre disectados y ondulados que se inician en Quinindé en su extremo norte y avanzan hasta la línea entre Daule y Pueblo Viejo al sur, sitio en el cual se difunden en la llanura aluvial reciente, al este limita con los piedemonte de la cordillera occidental de los Andes y al oeste con los relieves sedimentarios costeros (Winckell y Zebrowski, 1997) (**Figura 2.14**). Esta

zona se caracteriza por tener superficies disectadas con cimas redondeadas anchas o estrechas, con altitudes máximas de 15 m, pero que típicamente no sobrepasan los 5 m y cuyas pendientes oscilan entre 2 y 40 %.

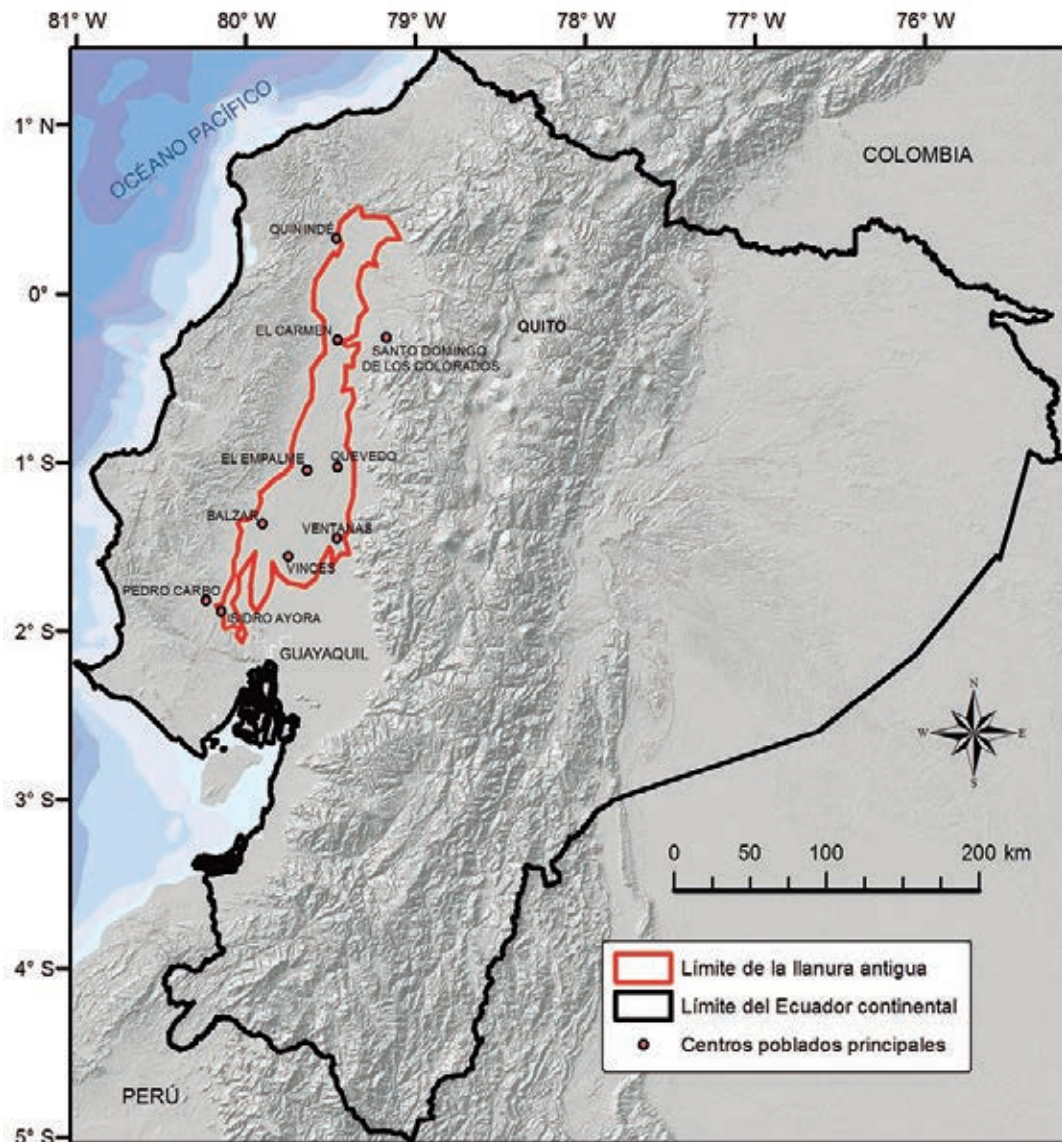


Figura 2.14. Ubicación de la llanura aluvial antigua con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell y Zebrowski (1997).

Genéticamente, esta llanura se asienta sobre depósitos antiguos que se acumularon por la abundante sedimentación proveniente del aporte de los principales ríos del norte de la Sierra, de los depósitos piroclásticos de material volcánico andino movidos por el viento y por el posterior encajonamiento provocado por el aumento consecutivo del escurrimiento hídrico fluvial causado por el deshielo del casquete glaciar andino y de la red hidrográfica antigua que tenía más capacidad y fuerza que la actual debido a uno o varios períodos de deshielo glaciar. La llanura antigua, llamada también llanura disectada, ha tenido entonces la influencia de tres conjuntos de factores formadores: a) disección de los sedimentos fluviales depositados; b) formaciones superficiales del tipo fluvial y piroclástica y; c) gradiente climático, húmedo al norte y seco al sur. Por esta razón, la llanura se divide en tres zonas homogéneas en términos de clima y pedogénesis: a) superficies con cobertura total de ceniza volcánica al norte; b) zonas con cobertura parcial de cenizas volcánicas al centro y; c) superficies sin recubrimiento de ceniza piroclástica al sur (Winckell y Zebrowski, 1997; León, 2010).

En términos de clima, la llanura antigua está localizada en la zona tropical megatérmica muy húmeda y húmeda. El extremo norte y la franja que bordea el piedemonte de los Andes reciben precipitaciones medias anuales que varían de 3 000 a 4 000 mm, repartidos en 195 días, con un déficit anual inferior a 150 mm (menos de 4 meses secos), con temperaturas medias diarias que fluctúan entre 24 a 25 °C (CLIRSEN, *et al.*, 2010a). En el centro (Vinces) la precipitación media anual llega a 1 500 mm y en el sur (Isidro Ayora) a 970 mm con 110 y 75 días de lluvia anual, respectivamente, lo que en el sur representa un déficit hídrico anual de 800 mm durante la estación seca (8-9 meses) (Huttel, 1997; Winckell y Zebrowski, 1997). Datos de estudios recientes para el cantón Vinces ratifican que la precipitación media anual de la zona fluctúa entre 1 400 a 1 650 mm y que las temperaturas medias diarias fluctúan entre 25 a 27 °C (CLIRSEN, *et al.*, 2009i). Un amplio sector del centro de la llanura antigua posee condiciones intermedias de clima caracterizadas por precipitaciones medias anuales de 2 000 mm, con un déficit hídrico anual de 500 mm (5 a 7 meses secos) (Winckell y Zebrowski, 1997).

En esta zona, la de mayor potencial agrícola del Ecuador, se localiza la producción de los más importantes cultivos para consumo nacional y para la exportación. Los cultivos que se destacan son cacao (*Theobroma cacao* L.), banano (*Musa div* sp.), palma aceitera, principalmente africana (*Elaeis guineensis*), mango (*Mangifera indica* L.), abacá (*Musa textiles* N.), plátano (*Musa paradisiaca*), maíz duro (*Zea mays* L.) y soya (*Glycine max* L. Merill) (Huttel, 1997; Pacheco, 2009; INEC, 2019).

2.2.4.1. Superficies con cobertura total de ceniza volcánica del norte

Esta zona corresponde a la parte norte de la alta llanura, que es a su vez la parte más húmeda (> 2 500 mm anuales de lluvia), condición que ha promovido la formación de arcillas amorfas (alófana e imogolita) como producto de la alteración de las cenizas volcánicas y la marcada pérdida de bases del complejo de intercambio (Winckell, *et al.*, 1997). En esta zona se diferencian dos tipos generales de suelos: a) Andisoles desaturados de régimen údico, hasta perúdic, formados de cenizas recientes, ligeramente hidromórficos en superficie y con cenizas antiguas de texturas más finas y ligeramente perhidratados a profundidad y; b) suelos con cobertura total de cenizas volcánicas que cubren paleosuelos rojos en un régimen de humedad údico. Los suelos predominantes de esta zona son Andisoles (**Figura 2.15** y **Cuadro 2.7**) con una profundidad efectiva > 50 cm, la textura superficial puede ser franca, franco arcillosa, franco limosa o franco arenosa, propiedad heredada de la cobertura de ceniza. A profundidad la textura de estos suelos no se aleja del rango de los francos, excepto cuando los subyacen paleosuelos caracterizados por su textura arcillosa pesada. En general, el drenaje de los suelos es óptimo. El pH de los suelos se concentra, en su mayoría, entre 6 y 7 en los horizontes superiores y en muy pocos perfiles el pH es ligeramente superior a 7 (MIDENA, *et al.*, 2013a).



Figura 2.15. Perfil de suelo Typic Hapludands (izquierda) en el sector Escuela Antonio José de Sucre, Valencia, Los Ríos, con una secuencia de horizontes A/Bw1/Bw2/Bw3/C/2Ab, ubicado sobre una superficie poco disectada de 2 % de pendiente (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013e).

Cuadro 2.7. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013e).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-15	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: franca; estructura: granular a bloques subangulares; ligera reacción al NaF; pH: 6.3; materia orgánica: 4.6 %; CIC: 24 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 34 %.
Bw1	15-40	Color en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3); textura: franca; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.5; materia orgánica: 2.4 %; CIC: 22 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 27 %.
Bw2	40-80	Color en húmedo: pardo oliva (2.5Y 4/4); textura de campo: franco limosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF.
Bw3	80-95	Color en húmedo: pardo oliva (2.5Y 4/3); textura de campo: franco limosa; estructura: bloques subangulares y angulares; fuerte reacción al NaF.
C	95-100	Color en húmedo: gris claro (2.5Y 7/2); textura de campo: arena; estructura: grano simple; fuerte reacción al NaF.
2Ab	100-105	Color en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3); textura de campo: franco limosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF.

2.2.4.2. Zonas con cobertura parcial de ceniza volcánica

Esta zona se encuentra ubicada en la parte central de la llanura disectada, entre El Empalme-Quevedo en el norte y Balzar-Ventanas en el sur. En esta área la cobertura de ceniza se vuelve más fina, el relieve es pronunciado y aparecen suelos inicialmente enterrados. El clima es más seco (< 1 500 mm), comparado con las zonas cubiertas totalmente de cenizas volcánicas del norte.

Los suelos son un poco más arcillosos que los de las zonas húmedas del norte y la cantidad de arcillas amorfas disminuye. Los suelos subyacentes (enterrados) son siempre suelos ferralíticos saturados (Winckell y Zebrowski, 1997). Los cultivos más importantes de esta zona son banano (*Musa div sp*), plátano (*Musa paradisiaca*), cacao (*Theobroma cacao*) y maíz (*Zea mays*). El perfil modal de esta zona pertenece a un suelo clasificado como Typic Hapludolls (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.16** y **Cuadro 2.8**).



Figura 2.16. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludolls (Soil Survey Staff, 2006) (izquierda) ubicado en Palma Sola, Mocache, Los Ríos, sobre una superficie disectada con pendiente < 12 % (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2012b).

Cuadro 2.8. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Hapludolls (MIDENA, *et al.*, 2012b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-7	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura: franca; estructura granular; pH: 6.7; materia orgánica: 8.9 %; CIC: 33 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 95 %.
A	7-40	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: franca; estructura: granular; pH: 5.7; materia orgánica: 6.7 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 93 %.
AB	40-57	Color en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3); textura: franco limosa; estructura: granular; pH: 6.1; materia orgánica: 1.3 %; CIC: 15 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 94 %.
Bw	57-85	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura de campo: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares.
C	85-100	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura de campo: arcillosa; estructura: masiva.

2.2.4.3. Superficies sin recubrimiento de ceniza

Esta zona, que entra en contacto con la llanura baja inundable, corresponde a la zona más seca de la llanura antigua lo que ha desarrollado un régimen ústico de humedad del suelo. Los suelos provienen exclusivamente de sedimentos aluviales antiguos ya que las cenizas recientes no alcanzaron estas áreas por su lejanía de los centros de emisión. Los suelos de la parte noreste, ubicados en la zona más húmeda cercana a la cordillera occidental, son ferralíticos, sin embargo, las precipitaciones decrecen hacia el oeste, lejos de la cordillera y los suelos pasan a ser fersialíticos y luego vérticos (Winckell y Zebrowski, 1997). Los suelos dominantes de esta región son Inceptisoles y Alfisoles (IGM, 2019b) (**Cuadro 2.9**). El perfil modal de esta zona corresponde a un suelo clasificado como Inceptic Haplustalfs (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.17** y **Cuadro 2.10**).

Cuadro 2.9. Distribución porcentual de los diferentes suelos a nivel de subgrupo (Soil Survey Staff, 2006), en las áreas correspondiente a los cantones Balzar, Colimes, Daule, Palestina, Santa Lucía, Pueblo Viejo y Vices ubicados en la parte sur de la llanura antigua caracterizada por no tener recubrimiento de ceniza volcánica (IGM, 2019b).

Subgrupo	%
Vertic Haplustepts	42.95
Vertic Haplustalfs	15.91
Inceptic Haplustalfs	9.21
Typic Haplustalfs	8.19
Vertic Paleustalfs	6.71
Oxyaquic Vertic Haplustalfs	3.59
Typic Haplusterts	2.08
Typic Haplustepts	1.27
Dystric Haplustepts	1.22
Otros	8.88



Figura 2.17. Perfil del suelo clasificado como Inceptic Haplustalfs ubicado en San José II, Pueblo Viejo, Los Ríos, con una secuencia de horizontes Ap/E/Bt1/Bt2/C (izquierda). El sitio está localizado en una superficie disectada con pendiente < 12 % (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2010e).

Cuadro 2.10. Características del perfil del suelo clasificado como Inceptic Haplustalfs (CLIRSEN, *et al.*, 2010e).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-10	Color en húmedo: gris muy oscuro (10YR 3/1); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.0; materia orgánica: 3.5 %; CIC: 22 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 47 %.
E	10-16	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 7.0; materia orgánica: 0.7 %.
Bt1	16-35	Color en húmedo: gris oscuro (2.5Y 4/1); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.7; materia orgánica: 1.0 %.
Bt2	35-50	Color en húmedo: gris oliva (5Y 5/2); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.1; materia orgánica: 0.3 %.
C	50-110	Color en húmedo: oliva (5Y 5/4); textura de campo: arcillosa; estructura: masiva.

En esta zona, y en general en toda la llanura antigua, existen valles cuyo sustrato corresponde a depósitos aluviales con pendientes planas (0 a 2 %) que en épocas lluviosas tienden a inundarse y que en épocas secas se aprovechan para cultivar con pastos, arroz (*Oriza sativa*), maíz (*Zea mays*) (IGM, 2019c). Como ejemplo de los suelos encontrados en estos valles se presenta el perfil de un suelo clasificado como Typic Endoaquerts (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.18** y **Cuadro 2.11**), ubicado en Baba, provincia de Los Ríos, caracterizado por presentar grietas, caras de deslizamiento (*slickensides*), alto contenido de arcillas 2:1 (montmorillonita-vermiculita), régimen de humedad áquico y un nivel freático localizado a los 55 cm en época seca, condición que limita su profundidad efectiva. Además, el suelo tiene una textura arcillo limosa en superficie y a profundidad el drenaje natural es malo ya que elimina muy lentamente el agua (SIGTIERRAS, 2016a).



Figura 2.18. Perfil del suelo clasificado como Typic Endoaquerts (izquierda) ubicado en Baba, Los Ríos, sobre el cual se cultiva arroz (derecha) (SIGTIERRAS, 2016a).

Cuadro 2.11. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Endoaquerts (SIGTIERRAS, 2016a).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ag	0-20	Color en húmedo: pardo (2.5Y 5/3), con moteado pardo oliva claro (2.5Y 2.5/1); textura: arcillo limosa; pH: 6.3; materia orgánica: 3.4 %; CIC: 20.1 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 100 %.
Bssg1	20-30	Color en húmedo: gris (2.5YR 5/1), con moteado rojo (2.5YR 4/6); textura: arcillo limosa; pH: 6.3; materia orgánica: 3.1 %; CIC: 20.7 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
Bssg2	30-45	Color en húmedo: gris (10YR 4/1), con moteado rojo (2.5 YR 4/6); textura: arcillo limosa; pH: 6.1; materia orgánica: 5.6 %; CIC: 21 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 99 %.
Bssg3	45-50	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 6/6), con moteado rojo (2.5YR 4/8); textura: arcillo limosa; pH: 6.6; materia orgánica: 1.2 %; CIC: 24 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 103 %.

2.2.5. Llanura aluvial reciente

La llanura aluvial reciente se ubica entre los conos del piedemonte andino al este, la llanura aluvial antigua al norte y los relieves sedimentarios de Manabí al oeste, pero la llanura se estrecha considerablemente entre Guayaquil y los cerros de Masvale y continúa hacia el sur formando solamente una estrecha franja de alrededor de 10 km que se prolonga hasta Arenillas (Winckell y Zebrowski, 1997) (**Figura 2.19**). Esta unidad está en la zona seca, sin embargo, las precipitaciones medias anuales se reducen de este a oeste (2 215 a 1 180 mm), pero también disminuyen de norte a sur (1 555 a 500 mm), con un periodo seco de entre 8 y 9 meses. Las temperaturas medias anuales son > 23 °C y las variaciones anuales de temperatura no sobrepasan los 4 °C. Esta es una zona de transición que tiende a ser semihúmeda al acercarse al piedemonte andino (Winckell y Zebrowski, 1997; Moreno, 2001).

Estas áreas provienen originalmente de los sedimentos detríticos cuaternarios de origen continental, aluvial, fluvio-lacustre a fluvio-marino que rellenaron una depresión topográfica creada por una fosa de subsidencia meridiana. La altitud del relieve es siempre inferior a 20 m, pero en la mayoría de las zonas solo alcanza 5 m, con un ligero incremento en altitud en dirección a los conos de piedemonte. Los modelados son planos y monótonos y las ondulaciones existentes, que nunca pasan los 2 o 3 m de desnivel, no son fácilmente perceptibles (Winckell and Zebrowski, 1997).

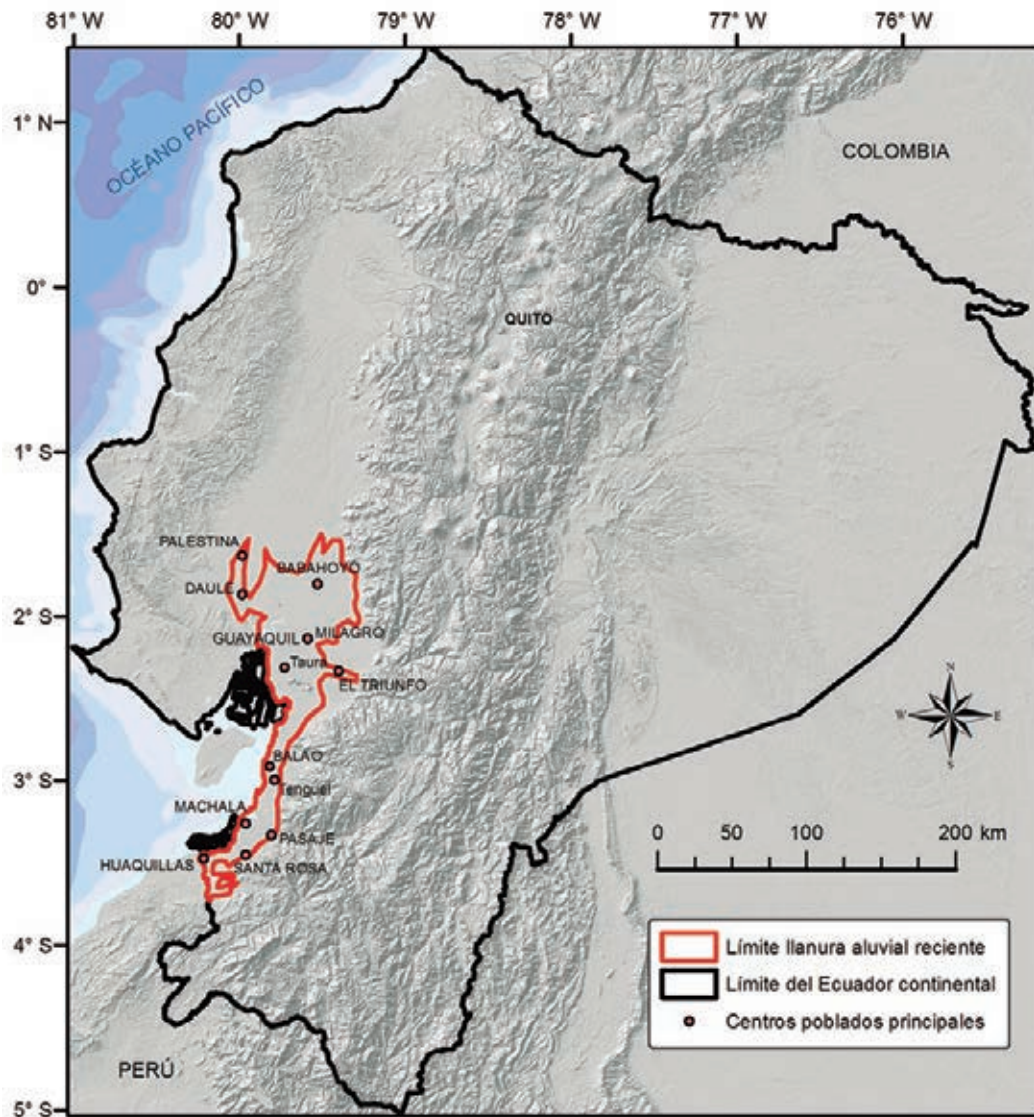


Figura 2.19. Ubicación de la llanura aluvial reciente respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell and Zebrowski (1997).

La formación de la llanura aluvial reciente se inicia con los fuertes procesos de erosión de la Sierra que generan abundantes sedimentos que son arrastrados por los ríos que finalmente llegan a la llanura aluvial antigua o a los conos de disección. Estos ríos se desbordan sobre esta gran planicie generando la decantación de partículas de arcilla y limo. La acumulación de sedimentos afecta al golfo de Guayaquil donde el ambiente fluvio-marino del estuario del río Guayas pierde terreno debido a que los aportes de sedimentos son mayores que los espacios provocados por el hundimiento continuo de subsidencia actual. En consecuencia, los suelos de la llanura aluvial reciente se remodelan por inundaciones periódicas de la estación lluviosa (Winckell y Zebrowski, 1997; Tapia, 2012).

Cabe destacar que dentro de esta llanura está inmersa la cuenca baja del río Guayas que es la zona de explotación agrícola más importante del país (Moreno, 2012). Esta cuenca está conformada por las zonas bajas de las subcuencas de los ríos Daule, Vinces, Babahoyo, Chimbo, Bulubulu, Taura y Churute (Sevillano, 2010).

Como consecuencia de los factores de formación recientes la llanura aluvial baja es inundable y tiene, en forma general, suelos arcillosos con textura homogénea hasta una apreciable profundidad. En los

suelos que tienen capa freática poco profunda se presentan horizontes de colores muy marcados por el hidromorfismo. En las zonas cercanas al medio fluvio-marino se pueden presentar suelos salinos y suelos totalmente inundados. Los suelos muy arcillosos (> 60 % de arcilla) están ubicados en la parte baja de esta llanura, son de color negro cuando no están sumergidos una parte del año, pero en las zonas más deprimidas frecuentemente están inundados gran parte del año y presentan color gris-oliva. Por lo general, el pH es ligeramente ácido (6 a 7), con una saturación de bases mayor al 50 % (Zebrowski y Sourdat, 1997; Moreno, 2001).

La llanura aluvial baja se caracteriza por tener una intensa utilización agrícola. Las zonas inundables en los niveles más bajos son importantes áreas de producción de arroz (*Oriza sativa*) que utiliza riego por inundación natural en la estación lluviosa y luego riego por bombeo en la época seca. Las zonas más altas, con menores riesgos de inundación, están ocupadas por plantaciones de caña de azúcar (*Saccharum* sp.) o banano (*Musa* div sp.) (Winckell y Zebrowski, 1997; IGM, 2019c).

2.2.5.1. Nivel plano

El nivel plano se caracteriza por tener pendientes que no sobrepasan el 2 % y sin desnivel relativo, razón por la cual son áreas que se inundan con frecuencia. Los suelos predominantes son Vertisoles (IGM, 2019b) (**Cuadro 2.12**) que se caracterizan por su textura pesada con presencia de arcillas de tipo expansivo, es decir, que se contraen en época seca formando grietas y se expanden en época lluviosa. Por su escaso desnivel relativo son suelos mal drenados con estructura masiva (CLIRSEN, *et al.*, 2009a).

Cuadro 2.12. Distribución porcentual de los diferentes tipos de suelos, a nivel de subgrupo (Soil Survey Staff, 2006), de los niveles planos (IGM, 2019b).

Subgrupo	%
Typic Hapluderts	58.26
Entic Haplusterts	10.70
Aquic Hapluderts	10.67
Fluventic Hapludolls	5.76
Typic Haplusterts	5.17
Typic Udifluvents	5.05
Aquic Haplustepts	3.25
Aeric Endoaquepts	0.67
Udic Haplusterts	0.35
Vertic Eutrudepts	0.07

Las pobres características físicas son la principal limitación de este tipo de suelos que generan condiciones de mal drenaje, baja conductividad del agua y aire, texturas pesadas, bajo desarrollo estructural, mala porosidad, saturación con agua y niveles freáticos altos (**Figuras 2.20 y 2.21, Cuadros 2.13 y 2.14**). Estos suelos son de muy difícil laboreo y tienen severas limitaciones para soportar cultivos, con excepción del arroz (*Oryza sativa* L.). Los costos de las prácticas de corrección de drenaje requeridos para habilitar el suelo para otros cultivos son muy elevados (Mejía, 1997).



Figura 2.20. Perfil de un suelo clasificado como Typic Hapluderts (izquierda) ubicado en El Silencio, Colimes, Guayas, en un nivel plano donde se sembró arroz (derecha). En todos los horizontes existe > 40 % de arcilla (CLIRSEN, *et al.*, 2009h).

Cuadro 2.13. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Hapluderts (CLIRSEN, *et al.*, 2009h).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo: negro (2.5Y 2;5/1); textura: arcillosa; estructura: bloques angulares; pH: 7.0; materia orgánica: 2.7 %; CIC: 42.4 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
Ass	20-40	Color en húmedo: negro (10YR 2/1); textura: arcillosa; estructura: bloques angulares; pH: 7.1; materia orgánica: 1.8 %; CIC: 41.1 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
Css1	40-120	Color en húmedo: gris muy oscuro (2.5 Y 3/1); textura: arcillosa; estructura: masiva; pH: 7.7; materia orgánica: 0.9 %; CIC: 47.0 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 99 %.
Css2	120-140	Color en húmedo: pardo grisáceo (2.5Y 5/2); textura: arcillosa; estructura: masiva; pH: 8.3; materia orgánica: 0.4 %; CIC: 36.9 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 99 %.



Figura 2.21. Perfil del suelo clasificado como Aquic Udifluents (izquierda) ubicado en Pimocha, Babahoyo, Los Ríos, en un nivel ondulado (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2009g).

Cuadro 2.14. Características del perfil Aquic Udifluvents (CLIRSEN, *et al.*, 2009g).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-16	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (2.5 y 3/2); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.6; materia orgánica: 2.9 %; CIC: 40.9 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 99 %.
2Ab	16-22	Color en húmedo: pardo gris muy oscuro (10YR 3/1), con moteado color pardo amarillento (10YR 5/8); textura: arcillosa; estructura: granular; pH: 7.2; materia orgánica: 2.5 %.
2C1	22-33	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (2.5Y 4/2), con moteado color amarillo oliva (2.5Y 6/8); textura de campo: arcillosa; estructura: masiva.
3C2	33-45	Color en húmedo: pardo oliva clara (2.5Y 5/3), con moteado color pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura de campo: arcillosa; estructura: masiva.

2.2.5.2. Bancos y diques aluviales

Los bancos y diques aluviales se ubican principalmente al margen de los ríos Daule y Babahoyo, pero también están a lo largo del borde sinuoso de la hidrografía de la llanura plana (**Figura 2.22**). Estas áreas son de origen deposicional, con una pendiente dominante de 0 a 5 % y un desnivel relativo que varía de 0 a 5 m de altura (CLIRSEN, *et al.*, 2009d). Los bancos y diques cumplen una importante función ambiental al conservar las riveras de los ríos con una cobertura vegetal que asocia árboles tropicales como el mango (*Mangifera indica*), que da sombra al café (*Coffea sp.*) y al cacao (*Theobroma cacao*), así como otros cultivos como banano (*Musa div sp.*), cítricos (*Citrus sp.*) y cultivos de subsistencia. Los bancos y diques aluviales cumplen, también, funciones de protección contra las crecientes de los ríos (Winckell y Zebrowski, 1997). En los bancos y diques aluviales predominan los suelos clasificados como Mollisoles (**Figuras 2.22-2.23**), seguidos por los Entisoles e Inceptisoles (IGM, 2019b) (**Cuadro 2.15**).

Gran cantidad de bancos aluviales de esta zona han sido alterados para ajustarse a los requerimientos del cultivo del arroz (*Oryza sativa L.*) y de plantaciones de caña de azúcar (*Saccharum sp.*). En la zona de Milagro, entre los años 1983 y 2010, se alteraron suelos clasificados como Fluventic Hapludolls, asociados generalmente a los bancos y diques aluviales, degradándolos a Fluventic Eutrudepts, principalmente por intervención antrópica en respuesta al descenso en el precio de cultivos como cacao y café y el ascenso en el precio caña de azúcar y arroz. Los agricultores literalmente eliminaban el horizonte móllico con el fin de encontrar capas arcillosas que soporten la producción de cultivos rentables como el arroz. Se calcula que la superficie afectada es de 5 971 ha (Sánchez, *et al.*, 2010).

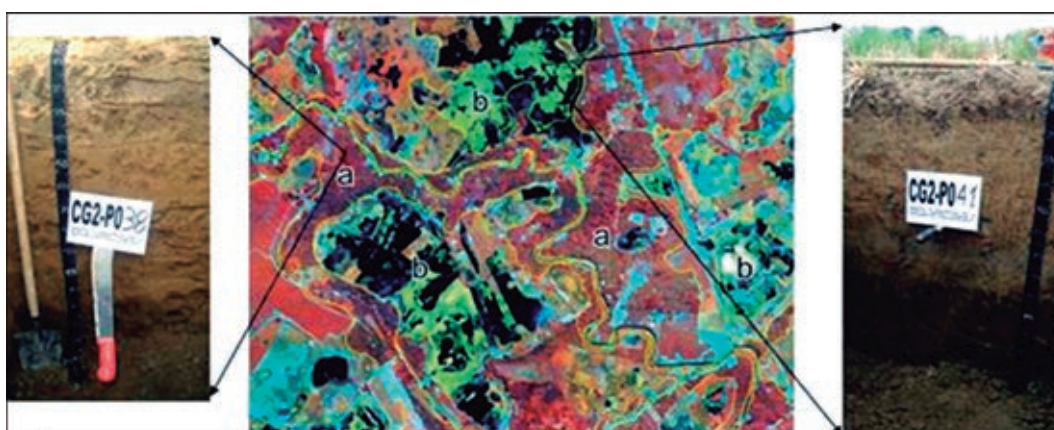


Figura 2.22. Relación suelo-vegetación en la llanura aluvial reciente. En el centro una imagen satelital KOMPSAT del año 2009 (combinación de bandas 4,2,1 -RGB-). A la izquierda, perfil de un suelo clasificado como Fluventic Hapludolls ubicado en El Hacha, Vinces, Los Ríos en un banco o dique aluvial (a en la imagen satelital). A la derecha, perfil de un suelo clasificado como Vertic Haplustepts ubicado en Junquillo, Vinces, los Ríos en una superficie poco disectada (b en la imagen satelital) (Sevillano, 2010).

Cuadro 2.15. Distribución porcentual de los diferentes tipos de suelo, a nivel de subgrupo (Soil Survey Staff, 2006), de los bancos y diques aluviales (IGM, 2019a).

Subgrupo	%
Fluventic Hapludolls	65.20
Fluventic Eutrudepts	15.30
Mollic Udifluvents	12.90
Typic Hapludolls	3.02
Typic Udifluvents	1.76
Vertic Eutrudepts	0.59
Typic Ustipsamments	0.43
Udic Ustifluvents	0.37
Otros	0.43

Estos suelos se caracterizan por tener textura variable dentro de los primeros 50 cm, pero, en general, la textura es franca, son friables, por lo tanto, fácilmente trabajables y de buen drenaje. De igual manera, las propiedades químicas son favorables para la producción agrícola, el pH no se aleja de la neutralidad, tienen un alto contenido de materia orgánica (> 2 %) y un porcentaje de saturación de bases > 50 % (SIGTIERRAS, 2016b).



Figura 2.23. Perfil del suelo clasificado como Fluventic Hapludolls (izquierda) ubicado en el cantón Palenque, Vices, Los Ríos, desarrollado sobre varias capas de depósitos friables sueltos en un banco aluvial, con una secuencia de horizontes Ap/Bw1/2Bw2/3C, sobre el cual se cultiva banano (derecha) (SIGTIERRAS, 2016b).

Cuadro 2.16. Características del perfil Fluventic Hapludolls (SIGTIERRAS, 2016b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo: gris (10YR 3/1), con moteado rojo (5YR 4/6); textura: franco arcillo limosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.6; materia orgánica: 3.7 %; CIC: 22.5 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 60 %.
Bw1	20-70	Color en húmedo: gris (10YR 5/1), con moteado rojo (2.5YR 5/6); textura: franco arcillo limosa; estructura: bloques subangulares y angulares; pH: 6.3; materia orgánica: 2.0 %; CIC: 23.4 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 79 %.
2Bw2	70-110	Color en húmedo: gris (10YR 6/2), con moteado rojo (10YR 5/8); textura: franco limosa; estructura: bloques subangulares.
3C	110-135	Color en húmedo gris (5Y 5/2), con moteado pardo (10YR 5/6); textura: franco arcillo limosa; estructura: masiva.

2.2.5.3. Nivel ligeramente ondulado con presencia de agua

Esta zona está ubicada en el área de influencia de los ríos Babahoyo y Daule, cauces que depositan sedimentos generando un modelado ligeramente perceptible a la vista como una asociación de muy suaves ondulaciones (3 a 5 m como máximo) y de depresiones permanentemente inundadas. Es el aspecto típico de un modelado ondulado del cual solo las cimas emergen de las aguas. Los sitios dentro de esta zona se caracterizan por presentar pendientes del 2 a 5 % si se encuentran en su estado natural y de 0 a 2 % si han sufrido mecanización. La cobertura vegetal está compuesta por cultivos como arroz, pastos y vegetación natural (**Figura 2.24**) (Winckell y Zebrowski, 1997; Moreno, 2001; CLIRSEN, *et al.*, 2009c). Los suelos predominantes en esta zona son Vertisoles e Inceptisoles, pero también se reporta la existencia de Entisoles y Mollisoles en menor proporción (**Cuadro 2.17**).

Cuadro 2.17. Distribución porcentual de los diferentes tipos de suelo, a nivel de subgrupo (Soil Survey Staff, 2006), en los niveles ligeramente ondulados (IGM, 2019b).

Subgrupo	%
Typic Haplusterts	24.92
Typic Hapluderts	19.40
Vertic Eutrudepts	9.12
Vertic Endoaquepts	9.11
Udic Haplusterts	5.57
Otros	31.88

En general, los suelos de este paisaje son muy arcillosos y poco profundos. Se representan en asociaciones debido a la dificultad de separarlos cartográficamente, por ejemplo, los suelos que están inundados la mayor parte del año (en las depresiones) poseen colores gley (verde oliva) y se los ha clasificado como Vertic Endoaquepts porque presentan un régimen de humedad áquico, en contraste, los suelos de las cimas emergidas tiene colores negros y se los ha clasificado como Udic Haplusterts (Moreno, 2001). Existen también suelos que se caracterizan por tener textura pesada y permanecen saturados por una parte del año (generalmente de enero a mayo) y, en consecuencia, presentan mal drenaje (**Figuras 2.25–2.26** y **Cuadro 2.18**). Estos suelos tienden a mostrar ligera acidez (pH 6.0 a 6.5) o ligera salinidad (conductividad eléctrica > 2.0 y < 4.0 dS m⁻¹) y saturación de bases > 50 % (Winckell y Zebrowski, 1997; Moreno, 2001; CLIRSEN, *et al.*, 2009c; CLIRSEN, *et al.*, 2009b).



Figura 2.24. Panorámica de un nivel ligeramente ondulado de suelos vérticos ubicado en la Cooperativa Vista Alegre, Samborondón, Guayas (CLIRSEN, *et al.*, 2009e).



Figura 2.25. Perfil del suelo clasificado como Typic Haplusterts (izquierda) ubicado en El Chorrillo, cantón Guayaquil. En estos suelos se cultiva de arroz (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2011h).



Figura 2.26. Perfil de suelo clasificado como Oxyaquic Eutrudepts (izquierda) ubicado en el sitio Valle Verde, Babahoyo, Los Ríos (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2009f).

Cuadro 2.18. Características del perfil Oxyaquic Eutrudepts (CLIRSEN, *et al.*, 2009f).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-21	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (2.5Y 4/2), con moteado pardo amarillento (10YR 5/8); textura: franco arcillo limosa; estructura: bloques subangulares; pH: 7.2; materia orgánica: 1.2 %; CIC: 34.4 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
Bg	21-56	Color en húmedo: gris oliva (5Y 4/2), con moteado pardo amarillento (10YR 5/8); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 7.1; materia orgánica: 0.7 %; CIC: 28.3 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
Cg	56-78	Color en húmedo: gris oliva (5Y 4/2), con moteado pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: franco arcillosa; estructura: masiva; pH: 7.3; materia orgánica: 0.7 %.

2.2.6. Piedemonte de la Cordillera Occidental

Esta unidad se ubica entre las vertientes andinas occidentales al este y la llanura aluvial al oeste (**Figura 2.27**). Su posición, inmediatamente al pie de la vertiente andina, origina su nombre. La unidad se formó a partir de depósitos coluvio-aluviales provenientes de los deshielos glaciares cuaternarios que con altas velocidades dibujaron figuras cónicas sobre la superficie de la llanura, por esta razón, los minerales son variados tanto en composición como en tamaño y forma. En la **Figura 2.28** se presenta un esquema que describe la dirección del arrastre de los depósitos (MIDENA, *et al.*, 2013a).

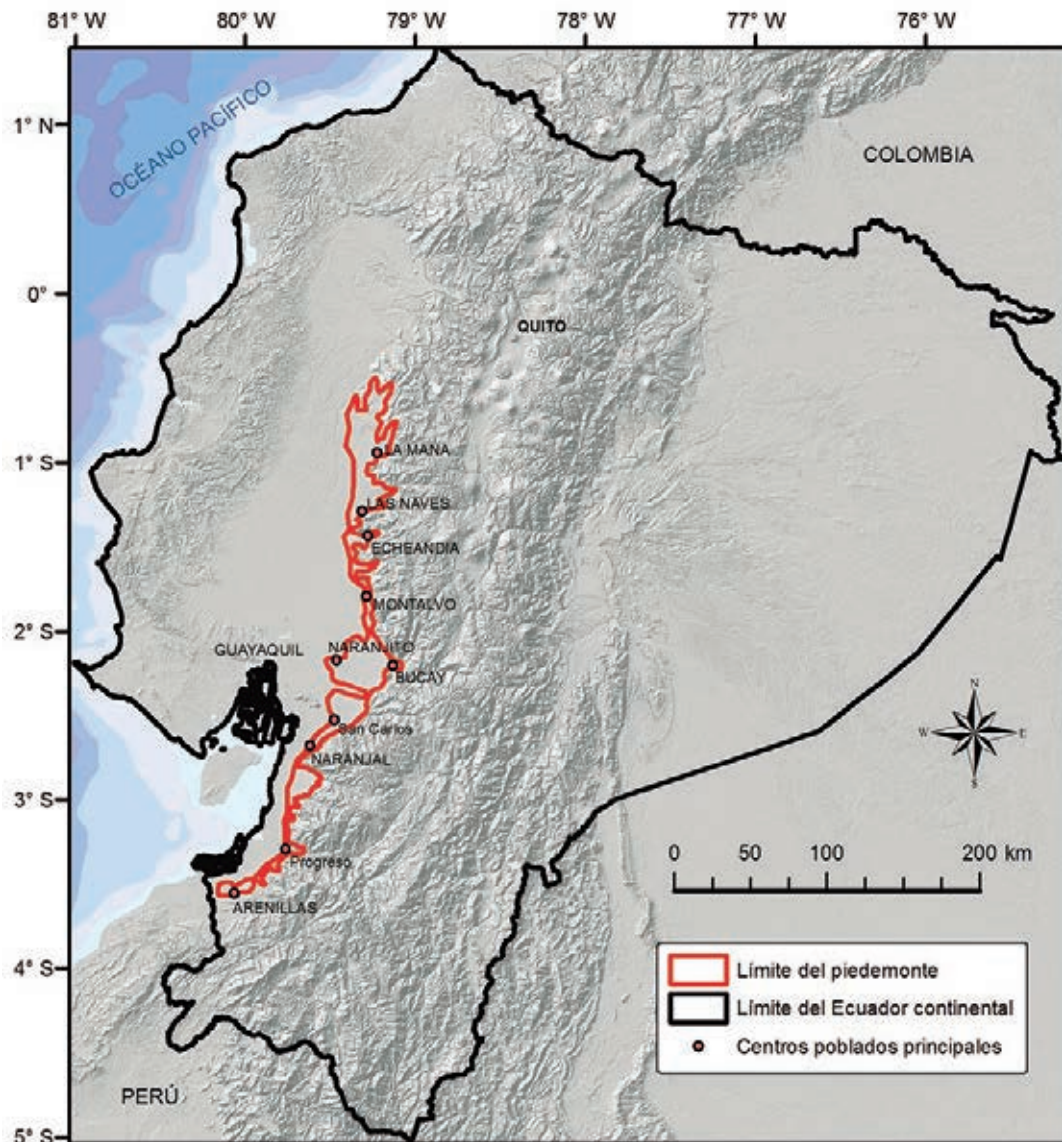


Figura 2.27. Ubicación del piedemonte de la cordillera occidental en el Ecuador continental. Adaptado de Winckell y Zebrowski (1997).

Existe una diferencia marcada entre los paisajes del norte del piedemonte de la cordillera occidental en comparación con los ubicados al centro y sur. Esto se debe a que el sector norte está completamente cubierto con piroclastos, condición que, además de suavizar el modelado de las geoformas, otorga características físicas y químicas particulares a los suelos de esta zona. Las alturas van disminuyendo conforme la unidad se desplaza hacia el sur, pasando de 1 000 a 800 m s. n. m. en Alluriquín y Santo Domingo al norte, hasta llegar a 20 m s. n. m. al entrar en contacto con la llanura aluvial al sur. De la misma manera, existe una reducción de la cantidad de precipitación media anual que varía de 2 660 mm en el sector norte a 500 mm en el sector sur. Además, existe también una gradiente secundaria de precipitación de este a oeste debido al bloqueo orográfico de la circulación atmosférica, así, las precipitaciones más altas se producen cerca de la cordillera andina (2 290 mm en Bucay) y las más bajas en el borde occidental (1 440 mm en San Carlos) (Winckell y Zebrowski, 1997). Dentro del piedemonte existen dos subunidades claramente definidas: los conos de deyección y los conos de esparcimiento.

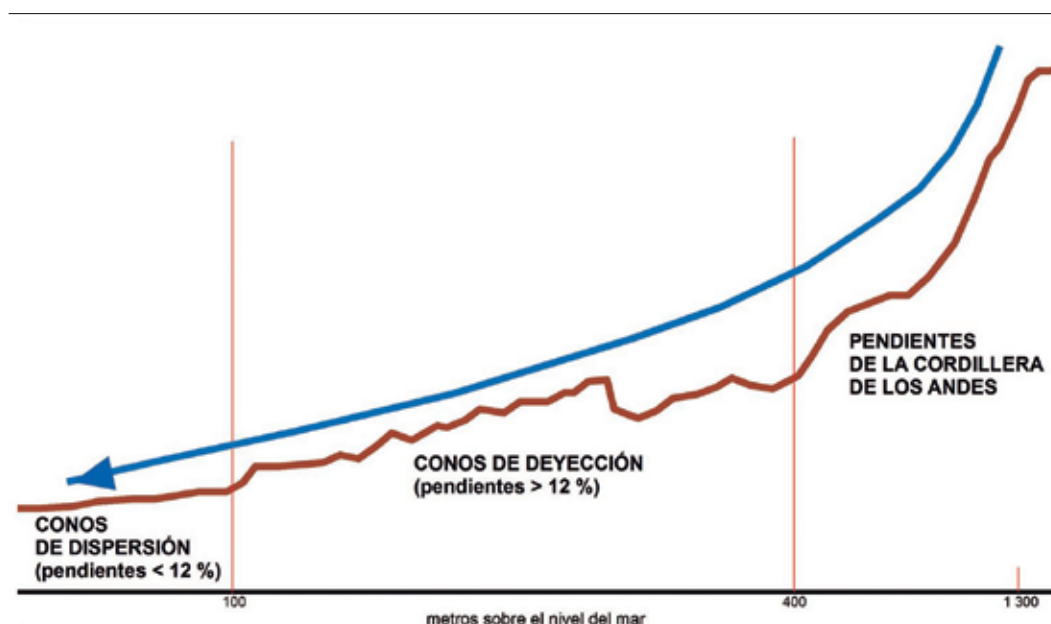


Figura 2.28. Perfil de la superficie del piedemonte de la cordillera occidental andina. La línea café representa la superficie del terreno y la flecha azul la dirección de los depósitos. Adaptado de MIDENA, *et al.* (2013a).

2.2.6.1. Conos de deyección

Los conos de deyección o conos aluviales se encuentran en contacto directo con las vertientes andinas (**Figura 2.28**) sobre pendientes que oscilan entre 12 a 25 %. Se caracterizan por presentar superficies disectadas debido a que han sido sometidos durante un largo intervalo de tiempo a la acción de procesos de remodelación. Esta zona se formó a partir de los deshielos glaciares por lo que está compuesta por depósitos detríticos, aluviales y torrenciales de guijarros, bloques y gravas en una matriz areno arcillosa que se extiende radialmente ladera abajo como consecuencia de la acentuada reducción de la pendiente desde el punto en el que el curso del agua abandona el área montañosa (MIDENA, *et al.*, 2013a). En los conos de deyección del piedemonte dominan los suelos clasificados como Andisoles y Alfisoles (IGM, 2019b) (**Cuadro 2.19**).

Cuadro 2.19. Distribución porcentual de ocupación de los diferentes tipos de suelo, a nivel de Orden (Soil Survey Staff, 2006), de los conos de deyección (IGM, 2019b).

Orden	%
Andisoles	44.04
Alfisoles	45.28
Inceptisoles	7.56
Entisoles	2.97
Mollisoles	1.15

Los suelos de la zona norte de esta unidad se encuentran cubiertos de ceniza volcánica de un espesor que varía entre 6 m en la parte norte (las zonas más cercanas a los centros de emisión) hasta llegar a 10 cm en la parte centro-norte de los conos de deyección. En esta zona predominan los suelos clasificados como Andisoles (**Cuadro 2.20**) que se caracterizan por presentar baja densidad aparente ($< 0.9 \text{ g cm}^{-3}$) y alta retención de humedad. La diferencia de humedad dentro del cono de deyección proporciona características particulares a

los suelos. En la zona más húmeda y cercana a los centros de emisión de ceniza se han desarrollado Andisoles desaturados (< 50 % saturación de bases), en las mismas zonas húmedas, pero más alejadas de los sitios de emisión se ubican los Andisoles perhidratados (retención de agua > 100 %) y en las zonas más secas están los Andisoles saturados (> 50 % saturación de bases) (Winckell y Zebrowski, 1997; MIDENA, *et al.*, 2013a).

Los suelos de la zona centro y sur de los conos de deyección se caracterizan por tener textura arcillo-pedregosa, debido a que se desarrollaron sobre depósitos originales areno-pedregosos. Estos suelos se han lixiviado por efecto del clima, en las zonas más húmedas son ferralíticos y en las más secas fersialíticos. Esta área está dominada por los suelos clasificados como Alfisoles (IGM, 2019b) (**Cuadro 2.20**).

Cuadro 2.20. Distribución porcentual de ocupación de los diferentes tipos de suelo, a nivel de subgrupo (Soil Survey Staff, 2006), en los sectores norte y centro sur de los conos de deyección (IGM, 2019b).

Subgrupo	%
Sector Norte	
Typic Hapludands	89.73
Thaptic Hapludands	10.27
Sector Centro Sur	
Typic Hapludalfs	49.97
Typic Hapludands	18.42
Inceptic Hapludalfs	13.49
Humic Dystrudepts	5.39
Typic Udorthents	4.32
Ultic Hapludalfs	3.67
Typic Dystrudepts	3.39
Mollic Paleudalfs	3.35
Andic Paleudalfs	2.53
Humic Eutrudepts	1.53

Como ejemplo de los suelos de la zona norte se presenta un perfil del clasificado como Typic Hapludands (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.29** y **Cuadro 2.21**) de poca profundidad (< 50 cm), textura franco arenosa, reacción ligeramente ácida (pH 6.5), alto contenido de materia orgánica (5.9 %) y una saturación de bases del 17.5 % (MIDENA, *et al.*, 2013d).



Figura 2.29. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (izquierda) ubicado en el sitio San Marcos, Valencia, Los Ríos, en una pendiente del 40 al 70 % (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013d).

Cuadro 2.21. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013d).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-22	Color en húmedo: negro (10YR 2/1), con moteado pardo amarillento oscuro (10YR 4/6); textura: franco arenosa; estructura: granular a bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.5; materia orgánica: 5.8 %; CIC: 14.0 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 17.5 %.
Bw	22-45	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.9; materia orgánica: 1.8 %; CIC: 13.0 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 9.1 %.
C	45-60	Color en húmedo: pardo (10YR 5/3); textura de campo: franco arenosa; estructura: masiva; fuerte reacción al NaF.
2C	60-72	Color principal en húmedo: pardo (10YR 5/3) y color secundario en húmedo: pardo muy pálido (10YR 7/3); textura de campo: areno francosa; estructura: masiva; fuerte reacción al NaF.
3Ab	72-110	Color principal en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3) y color secundario en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 7.3; materia orgánica: 3.1 %.
3Bw	110-120	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: franca; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF.

Un ejemplo de un suelo de la zona centro y sur del cono de deyección es el que se presenta en la **Figura 2.30** y en el **Cuadro 2.22**. Este suelo, clasificado como Vertic Haplustalfs (Soil Survey Staff, 2006) tiene poca profundidad efectiva (< 50 cm) debido a que presenta texturas arcillosas a partir de los 55 cm de profundidad, lo que impide la penetración de las raíces. La textura superficial (0-15 cm) es franco arcillosa (36 % de arcilla). Los promedios ponderados de pH, materia orgánica y saturación de bases en los primeros 55 cm son de 6.0, 1.6 % y 54.9 %, respectivamente, condiciones de un suelo de alta fertilidad natural (MIDENA, *et al.*, 2013f).



Figura 2.30. Perfil del suelo clasificado como Vertic Haplustalfs (izquierda) ubicado en la hacienda Sibamba, Ventanas, Los Ríos, que tiene una secuencia de horizontes A/Bt/C, sobre el cual está sembrado sandía (*Citrullus lanatus*) (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013f).

Cuadro 2.22. Características del perfil del suelo clasificado como Vertic Haplustalfs (MIDENA, *et al.*, 2013f).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-15	Color en húmedo: pardo pálido (10YR 7/6); textura: franco arcillosa; estructura: granular a bloques subangulares; sin reacción al NaF; pH: 5.7; materia orgánica: 3.6 %; CIC: 21 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 44 %.
Bt	15-55	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares; sin reacción al NaF; pH: 6.2; materia orgánica: 0.9 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 59 %.
C	55-90	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10 YR 4/6); textura: arcillosa; estructura: masiva; sin reacción al NaF; pH: 6.1; materia orgánica: 0.6 %; CIC: 24 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 54 %.

2.2.6.2. Conos de Esparcimiento

Esta unidad se encuentra inmediatamente abajo del relieve de los conos de deyección. Los depósitos aluviales se han esparcido sobre áreas más extensas y han modelado relieves de menor inclinación, con superficies mayoritariamente planas y amplias ondulaciones de pendientes que no superan el 12 %. Conforme el relieve se acerca a la llanura reciente, los depósitos son areno-pedregosos en la parte alta y areno-limosos en la parte baja.

La parte norte de los conos de esparcimiento está recubierta por cenizas volcánicas y el clima húmedo ha permitido que se desarrollen Andisoles desaturados, sin embargo, en climas menos húmedos los suelos son Andisoles saturados. La zona sur de esta unidad, más seca y sin cobertura de ceniza volcánica, presenta suelos areno-limosos con gravas en la parte alta y arcillo-limosos en la parte baja que es la que entra en contacto con la llanura reciente. En esta zona los depósitos no se han envejecido totalmente debido a la edad más reciente de los depósitos y al clima menos húmedo, esta condición ha promovido el desarrollo de arcillas de tipo 2:1 (Winckell y Zebrowski, 1997).

Un suelo característico de la parte septentrional del cono de esparcimiento se presenta en la **Figura 2.31** y en el **Cuadro 2.23**. Este suelo, clasificado como Typic Hapludands (Soil Survey Staff, 2006), presenta buenas características físicas (textura franca dentro de los primeros 36 cm de profundidad) que permiten el laboreo para aprovechamiento agrícola (MIDENA, *et al.*, 2013c).



Figura 2.31. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (izquierda) ubicado en La Unión Vieja, Valencia, Los Ríos. El suelo presenta una secuencia de horizontes A1/A2/Bw1/Bw2/2Ab/2Bw, evidenciando la presencia de dos eventos de depósito de ceniza volcánica sobre la superficie del cono de esparcimiento. En este relieve de pendiente < 12 % se cultiva generalmente banano (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013c).

Cuadro 2.23. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013c).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A1	0-13	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: franca; estructura: granular a bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.9; materia orgánica: 8.8 %; CIC: 37 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 54 %.
A2	13-36	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: franca; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.8; materia orgánica: 1.8 %; CIC: 14 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 42 %.
Bw1	36-52	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 7.1; materia orgánica: 0.4 %; CIC: 12 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 50 %.
Bw2	52-72	Color principal en húmedo: pardo amarillento oscuro (2.5Y 6/3) y color secundario en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/6); textura de campo: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF.
2Ab	72-83	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura de campo: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.4; materia orgánica: 1.1 %.
2Bw	83-105	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 3/6); textura de campo: arcillosa; estructura: bloques subangulares; media reacción al NaF.

El perfil de suelo presentado en la **Figura 2.32** y en el **Cuadro 2.24** representa a la parte sur del cono de esparcimiento sin cubrimiento de ceniza volcánica. Este suelo se clasifica como Mollic Udifluents (Soil Survey Staff, 2006). La textura de los primeros 68 cm de profundidad del perfil varía de arcillosa a franco limosa, pero entre 68 y 100 cm la textura es arenosa (MIDENA, *et al.*, 2013b).



Figura 2.32. Perfil del suelo clasificado como Mollic Udifluents (izquierda) ubicado en una plantación de banano (derecha) en Santa Isabel, El Triunfo, Guayas, que presenta una secuencia de horizontes Ap/AC/2C1/3C2/3C3/3C4 (MIDENA, *et al.*, 2013b).

Cuadro 2.24. Características del perfil del suelo clasificado como Mollic Udifluvents (MIDENA, *et al.*, 2013b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-30	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (2.5YR 3/2); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares; densidad aparente: 1.2 g cm ⁻³ ; pH: 5.5; materia orgánica: 4.9 %; CIC: 30 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 40 %.
AC	30-68	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (2.5 YR 4/2), con moteado pardo amarillento (10YR 5/8); textura: franco limosa; estructura: masiva a bloques subangulares; densidad aparente: 1.2 g cm ⁻³ ; pH: 7.2; materia orgánica: 0.6 %; CIC: 25 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 90 %.
2C1	68-83	Color en húmedo: pardo oliva (2.5YR 4/3), con moteado pardo fuerte (7.5YR 4/6); textura: arenosa; estructura: grano simple; pH: 7.0; materia orgánica: 0.2 %; CIC: 18 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 97 %.
3C2	83-110	Color en húmedo: gris oscuro (10YR 4/1); textura de campo: areno francosa; estructura grano simple.
3C3	110-120	Color principal en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/3) y color secundario en húmedo: gris oscuro (2.5Y 4/1); textura de campo: areno francosa; estructura grano simple.
2C4	120-130	Color principal en húmedo: gris oscuro (2.5Y 4/1) y color secundario en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 3/4); textura de campo: arena; estructura grano simple.

2.2.7. Relieves sedimentarios y fluvio-marino

Los relieves sedimentarios y fluvio-marinos están localizados en las regiones costaneras centrales de Manabí y la Península de Santa Elena. El desarrollo de estos relieves se debe a la acción directa del mar, a los diferentes procesos marinos relacionados con los eventos de transgresión-regresión marina y por la presencia de depósitos antiguos y recientes que dan lugar a las planicies costeras, cordones litorales y diferentes niveles de mesas marinas. Estos paisajes comprenden las costas medianas y bajas, tienen pequeños acantilados y grandes playas rectilíneas delanteras en los sectores donde se depositaron las diferentes transgresiones cuaternarias localizadas cerca de la ciudad de Manta y en toda la periferia de la península de Santa Elena (**Figura 2.33**) (Winckell y Zebrowski, 1997; Collot, *et al.*, 2009). La vegetación característica de la región es herbácea y arbustiva, típica de las zonas de vida de matorral desértico y espinoso tropical. La temperatura media anual supera los 23 °C (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997).

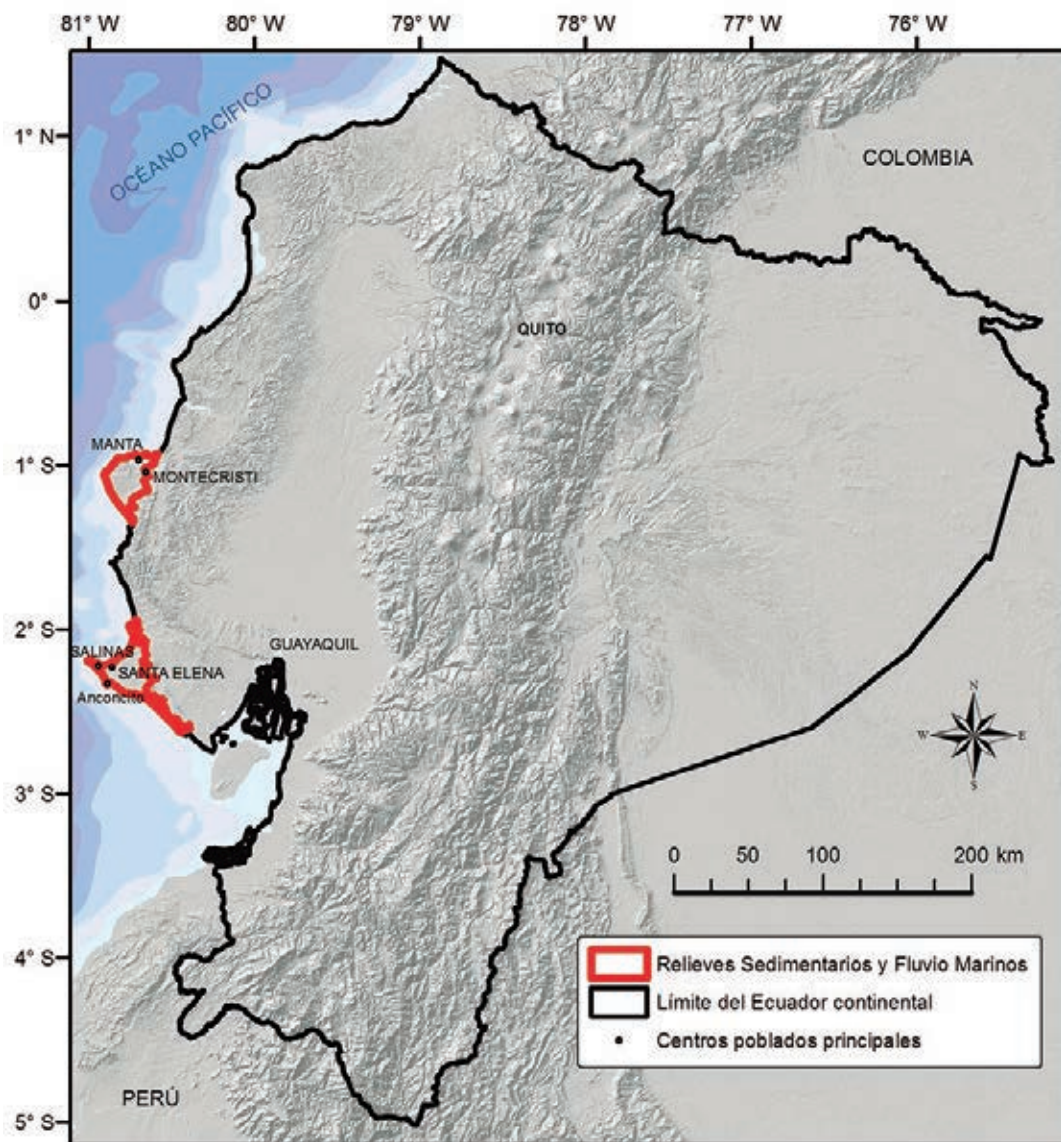


Figura 2.33. Ubicación de los relieves sedimentarios y fluvio-marinos con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell and Zebrowski (1997).

2.2.7.1. Mesas de areniscas calcáreas

Las mesas calcáreas corresponden a las zonas de clima tropical seco a subdesértico que reciben directamente los efectos reseccantes de la corriente fría de Humboldt, la precipitación media anual es de 240 mm cerca de la costa, 400 mm tierra adentro y hasta 800 mm en las cimas de las mesas. Esta zona cubre principalmente las mesas litorales encaramadas, onduladas y disectadas en forma desigual ubicadas sobre sedimentos recientes (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997). Estas mesas de arenisca calcárea se extienden en un plano inclinado desde los 80 a 360 m s. n. m. desde la línea costanera hasta el interior llegando hasta Montecristi. La continuidad de todas estas superficies se debe a la existencia de transgresiones marinas recientes que depositaron una sucesión de sedimentos detríticos, probablemente de edad pleistocena, que fueron afectados por la tectónica cuaternaria. Están localizados exactamente en el lugar donde la cordillera submarina de Carnegie entra en colisión con el continente, lo que permitió que los depósitos de estas transgresiones se eleven a altitudes superiores a los 350 m s. n. m. La composición está definida por capas alternas de arenas y areniscas más o menos cimentadas y areniscas calcáreas fosilíferas

entre los cuales hay un conglomerado basal bien cimentado, correspondiente a la formación Tablazo. Sobre las vertientes de las quebradas se alternan formaciones conformadas por afloramientos rocosos sobre bancos más consolidados de areniscas calcáreas compactadas de grano fino a medio, lumaquelas y, en muchos casos, depósitos recientes de arena (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997; Collot, *et al.*, 2009).

Los suelos de esta zona son arcillosos, vérticos, moderadamente profundos, con discontinuidad textural de lumaquelas entre los 10 y 50 cm (horizonte superior pobre en arcilla y el subyacente más arcilloso), frecuentemente presentan acumulaciones de carbonato de calcio e inclusive de yeso debido a que el clima del suelo varía de seco a muy seco (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997).

El perfil modal de un suelo representativo de esta zona clasificado como Typic Haplustalfs (Soil Survey Staff, 2006) se presenta en la **Figura 2.34** y se describe en el **Cuadro 2.25**. Morfológicamente presenta un perfil de tipo A/E/Bt/C en el cual se distingue un horizonte álbico sobre un horizonte argílico. Este tipo de suelos se localiza en las geoformas de las superficies de mesas marinas de pendientes < 5 % y se caracteriza por tener un régimen ústico de humedad e isohipertérmico de temperatura (CLIRSEN, *et al.*, 2011j).



Figura 2.34. Perfil del suelo Typic Haplustalfs (izquierda) ubicado en Camarones de Arriba, Montecristi, Manabí, en una superficie disectada de mesa marina donde la vegetación es predominantemente seca (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2011d).

Cuadro 2.25. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Haplustalfs (CLIRSEN, *et al.*, 2011d).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-8	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: franco limosa; estructura: bloques subangulares; pH: 7.4; materia orgánica: 0.3 %; CIC: 26 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 94 %.
E	8-22	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franco limosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.9; materia orgánica: 0.3 %; CIC: 17 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 91 %.
Bt	22-53	Color en húmedo: gris muy oscuro (10YR 3/1); textura: arcillosa; estructura: prismática; pH: 7.4; materia orgánica: 0.3 %; CIC: 30 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 96 %.
C	53-110	Color en húmedo: pardo amarillento claro (2.5Y 6/3); textura: arcillosa; estructura: masiva; pH: 8.8; materia orgánica: 0.3 %.

2.2.7.2. Franja litoral

Esta zona se localiza en la parte occidental de la península de Santa Elena en planicies y ondulaciones caracterizadas por relieves bastante bajos de colinas sedimentarias arcillosas a areniscosas. Esta península está totalmente expuesta a los efectos desertificadores de la corriente fría de Humboldt e inclusive podría considerarse que la punta de Salinas es la parte final del desierto costanero peruano, en consecuencia, las precipitaciones son muy bajas. Las precipitaciones medias anuales son < 100 mm en Salinas y llegan hasta 400 mm en Playas. Este paisaje, de climas subdesérticos a desérticos costaneros, se divide en tres subpaisajes a) colinas erosionadas del basamento sedimentario, b) ondulaciones bajas de los niveles más recientes y c) depósitos litorales.

Colinas erosionadas del basamento sedimentario

Este tipo de paisajes se localiza en dos sectores bien definidos de la costa ecuatoriana, detrás de la costa de Santa Elena al norte y a cada lado de Ancón al sur. Esta zona se caracteriza por tener relieves < 50 m, con cimas planas truncadas por la abrasión marina cuaternaria, cubiertas o no por depósitos marinos. En general, es un medio con pendientes fuertes ($> 40\%$), con disección variable y la vegetación escasa y xerofítica no cubre y estabiliza el suelo que en inviernos fuertes se erosiona formando barrancos (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997).

Un suelo característico de esta zona, clasificado como Ustic Haplocalcids (Soil Survey Staff, 2006), se presenta en la **Figura 2.35** y en el **Cuadro 2.26**. Estos suelos de incipiente desarrollo presentan exceso de carbonatos, yeso o sales que limitan drásticamente el desarrollo de la mayoría de los cultivos. La característica principal de estos suelos es la presencia de un horizonte cálcico sobre un petrocálcico donde se han acumulado carbonatos que originan un horizonte duro. El perfil tomado como referencia se encuentra en pendientes medias (12 a 25 %); presenta textura franco arenosa en la superficie como a profundidad y una secuencia de horizontes Ak/ABk/Bwk/Ck1/Ck2. Los colores oscilan entre gris parduzco claro a pardo grisáceo oscuro en los horizontes superiores, en tanto que el horizonte Ck1 es gris parduzco claro. En el horizonte superficial el pH es de 8.7 (CLIRSEN, *et al.*, 2012c).



Figura 2.35. Perfil modal de un suelo clasificado como Ustic Haplocalcids (izquierda) ubicado en la vía San Vicente, Santa Elena, en zonas de vertientes de mesa marina de la Formación Tablazo (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2012c).

Cuadro 2.26. Características del perfil del suelo clasificado como Ustic Haplocalcids (CLIRSEN, *et al.*, 2012c).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ak	0-20	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) y color en seco: gris parduzco claro (10YR 6/2); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, con presencia común de fragmentos gruesos del tipo grava gruesa; pH: 8.7; materia orgánica: 0.7 %; CIC: 26 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 95 %.
ABk	20-32	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) y color en seco: gris (10YR 6/1); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, con presencia común de fragmentos gruesos del tipo grava media; pH: 8.8; materia orgánica: 0.3 %; CIC: 28 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
Bk	32-52	Color en húmedo: pardo oliva (2.5Y 4/4) y color en seco: pardo oliva claro (2.5Y 5/3); textura de campo: arcillo arenosa; estructura: granular a bloques subangulares, con muchos fragmentos gruesos del tipo grava media; pH: 8.9; materia orgánica: 0.3 %.
Ck1	52-86	Color en húmedo: gris oscuro (2.5Y 4/1) y color en seco: gris parduzco claro (2.5Y 6/2); textura de campo: arena franca; estructura: masiva, porosa, con muchos fragmentos gruesos del tipo grava media.
Ck2	86-115	Color en húmedo: gris parduzco claro (2.5Y 6/2) y color en seco: amarillo pálido (2.5Y 8/2); textura de campo: arena franca; estructura: masiva, porosa, con muchos fragmentos gruesos del tipo grava media.

Ondulaciones bajas de los niveles más recientes

Esta zona está conformada por relieves formados por depósitos marinos cuaternarios no cimentados de arenas finas y gruesas, calcáreas, que contienen un alto porcentaje de gravillas y trozos de conchas. Estos depósitos se alternan con arenas arcillosas y arcillas de color crema a verdoso y lechos areniscos-conglomeráticos ricos en conchas. Estos paisajes pertenecen también a la formación Tablazo y cubren casi la totalidad de la puntilla de Salinas y prosiguen hasta Playas (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997; Collot, *et al.*, 2009).

El perfil de un suelo representativo de esta zona se presenta en la **Figura 2.36** y en el **Cuadro 2.27**. Este suelo, ubicado en pendientes medias (< 25 %), está clasificado como Typic Haplocalcids (Soil Survey Staff, 2006), presenta exceso de sales, condición que limita el crecimiento de la mayoría de los cultivos. Morfológicamente, el suelo presenta los horizontes A/Bw/BCk/Ck1/Ck2. El horizonte A tiene textura franco arcillo arenosa, el Bw franco arcillo arenosa y el BCk franco arenosa, es decir, las texturas más gruesas aparecen a profundidad (CLIRSEN, *et al.*, 2011f).



Figura 2.36. Perfil del suelo clasificado como Typic Haplocalcids (izquierda) ubicado en el sitio Voluntad de Dios, La Libertad, Santa Elena, en una ondulación baja de niveles más recientes. El sitio se caracteriza por tener vegetación de clima muy seco (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2011f).

Cuadro 2.27. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Haplocalcids (CLIRSEN, *et al.*, 2011f).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-10	Color en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3) y color en seco: pardo grisáceo (10YR 5/2); textura: franco arcillo arenosa; estructura: bloques subangulares; pH: 8.2; materia orgánica: 2.1 %; CIC: 27 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 95 %.
Bw	10-26	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3) y color en seco: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franco arcillo arenosa; estructura: bloques subangulares; pH: 8.4; materia orgánica: 0.1 %; CIC: 25 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 94 %.
Bck	26-45	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) y color en seco: pardo amarillento claro (10YR 6/4); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; pH: 8.5; materia orgánica: 0.3 %; CIC: 25 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 94 %.
Ck1	45-65	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) y color en seco: pardo amarillento (10YR 5/4); textura: franco arenosa; estructura: masiva, porosa; pH: 8.2; materia orgánica: 0.1 %.
Ck2	65-105	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 5/6) y color en seco: amarillo pálido (2.5Y 7/4); textura de campo: franco areno francosa; estructura: masiva, porosa.

Depósitos litorales

Esta zona corresponde a los depósitos marinos cuaternarios arenosos y a los depósitos salinos marinos calcáreos de limos y arcillas que contienen numerosos residuos de conchas. Los depósitos están localizados en playas, cordones litorales y rellenos de lagunas detrás de los cordones. Las playas y los cordones litorales están constituidos por arenas finas y muy finas, muchas veces movilizadas por el viento. Las lagunas interiores están constituidas comúnmente por depósitos variados de tipo arcilloso a arcillo-limoso. Los fenómenos eólicos que se presentan sobre el contorno de las costas, especialmente sobre el litoral sur, son promovidos por los fuertes vientos provenientes del océano que remobilizan los depósitos arenosos actuales y antiguos formando dunas (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997).

Los suelos de estas playas emergidas y cordones litorales se clasifican como Typic Torripsamments (**Figura 2.37** y **Cuadro 2.28**) (Soil Survey Staff, 2006), muestran muy poca o ninguna evidencia de desarrollo pedogenético, están localizados en pendientes suaves (5 al 12 %), tienen textura arenosa y, en consecuencia, el drenaje es excesivo (CLIRSEN, *et al.*, 2011a).



Figura 2.37. Perfil del suelo clasificado como Typic Torripsamments (izquierda) ubicado en la playa de la Lotización Caracoles, Manta, Manabí (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2011e).

Cuadro 2.28. Características el perfil del suelo clasificado como Typic Torripsamments (CLIRSEN, *et al.*, 2011e).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
C1	0-70	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (2.5YR 4/2) y color en seco: pardo grisáceo (2.5Y 5/2); textura: arena; estructura: grano simple; pH: 8.2; materia orgánica: 0.1 %; CIC: 25 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 96 %.
C2	70-130	Color en húmedo: pardo grisáceo (2.5Y 5/2); textura: arena; estructura: grano simple.

2.2.8. Cuenca del Progreso

Esta es una zona de subsidencia ubicada en el triángulo que forma la cordillera de Chanduy-Playas al oeste y suroeste y la cordillera costanera de Chongón y Colonche al norte. Ocupa la mitad oriental de la península de Salinas y en ella se incluye la isla Puná, ubicada inmediatamente al sureste de la península, en el eje del estuario del delta del río Guayas, isla que mantiene la continuidad de los rasgos estructurales mayores de la cuenca (**Figura 2.38**). En general, esta cuenca está formada por relieves de origen estructural-sedimentario del periodo terciario alrededor de un eje noroeste y sureste y altitudes entre 50 y 200 m s. n. m. que han sido rellenadas por sedimentos oligo-miocenos más recientes a medida que se desplaza hacia el centro este de la cuenca. Aquí se pueden observar modelados que van de planos a ligeramente ondulados en el contorno oriental, así como relieves vigorosos y vestigios de relieves monoclinales (cuestas y mesas) de conglomerados de areniscas y arcillas, además de depresiones arcillo-gravosas ubicados al oeste (MAG y ORSTOM, 1978; Winckell y Zebrowski, 1997).

El clima de la cuenca de El Progreso se caracteriza por tener precipitaciones medias anuales que varían de 400 mm al oeste a 1 000 mm al este. De igual manera, en dirección de oeste a este, los días de lluvia cambian de 20 a 80, el número de meses secos de 12 a 9, el déficit hídrico anual de 1 000 a 750 mm y la temperatura media anual está sobre los 22 ° C. Tomando en cuenta lo anterior, en esta zona se pueden diferenciar los siguientes regímenes climáticos: a) áridos al oeste y suroeste; b) muy secos en la corona interior; c) secos al noreste; y d) húmedos en los altos relieves que están cubiertos por nubosidad que produce garúa. El clima de la isla Puná es muy seco (MAG y ORSTOM, 1978; Winckell y Zebrowski, 1997; CLIRSEN, *et al.*, 2011c; CLIRSEN, *et al.*, 2012a).

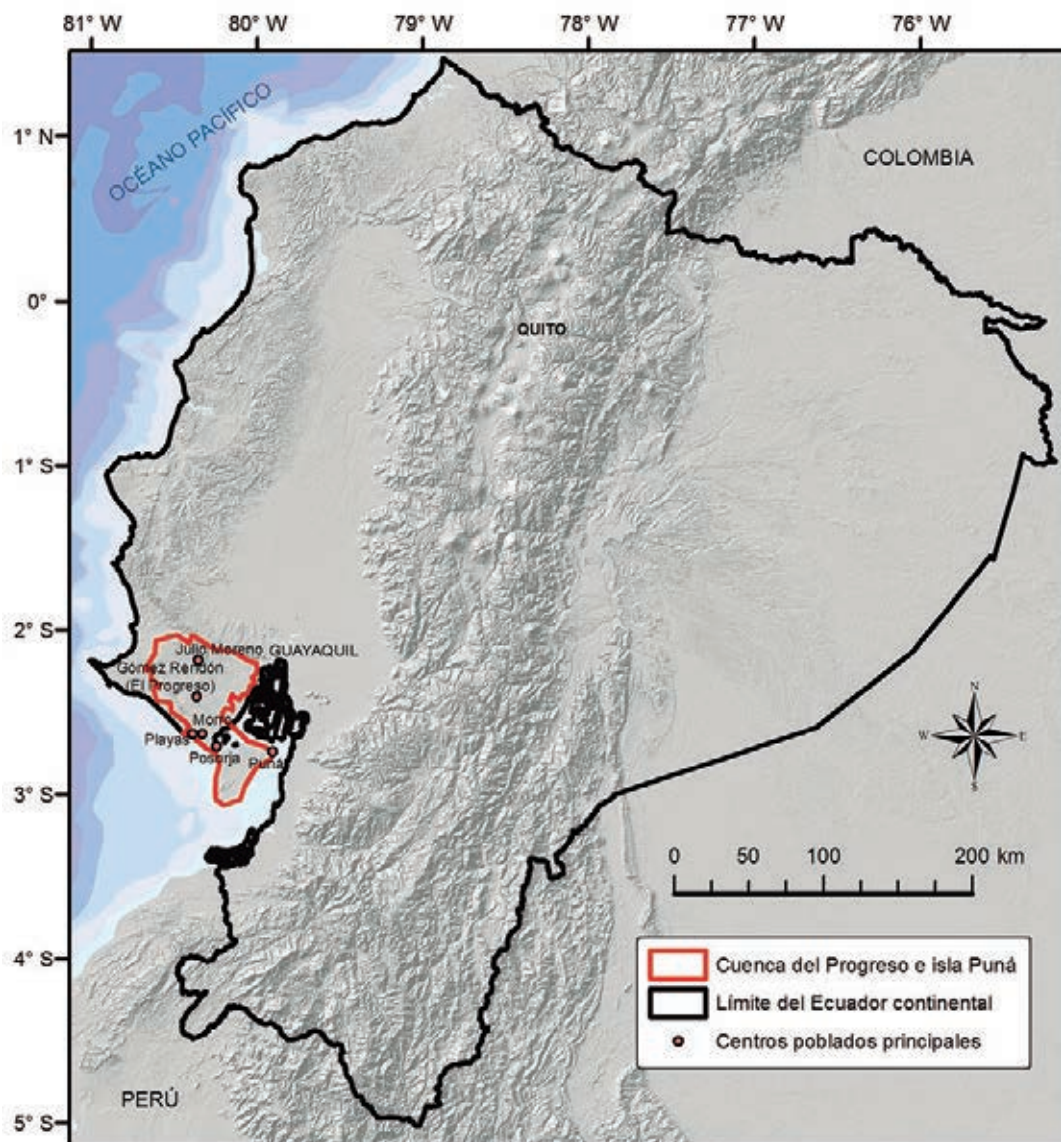


Figura 2.38. Ubicación de la cuenca del Progreso, respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell and Zebrowski (1997).

Los suelos de esta unidad están influenciados por tres factores de formación: a) clima seco, factor predominante que hace que las reacciones físicas y químicas sean menos intensas que en las zonas húmedas favoreciendo la formación de materiales arcillosos tipo 2:1, la acumulación de bases y la frecuente acumulación de carbonatos y yeso; b) material parental que influye en el tipo de minerales que heredan los suelos, por ejemplo, el alto nivel de potasio (K^+) de estos suelos se debe a los feldespatos y micas presentes en las rocas de esta zona; y c) relieve, los suelos son más jóvenes mientras más accidentado sea el relieve debido a que están expuestos a constante erosión (MAG y ORSTOM, 1978; Mejía, 1997).

Históricamente, la cuenca del Progreso, llamada también Gómez-Rendón, no ha sido una zona de explotación agrícola importante por las restricciones del clima, particularmente las bajas precipitaciones. Son comunes cultivos de subsistencia [(maíz (*Zea mays*) y maní (*Arachis hypogaea*)] localizados alrededor de los pueblos y la ganadería extensiva, especialmente de caprinos, que utilizan las zonas cubiertas de vegetación natural como área de pastoreo (Winckell y Zebrowski, 1997). Al momento, el trasvase de agua Chongón – San Vicente provee de agua a la zona y pequeños productores asociados producen cultivos como maíz (*Zea mays*), melón (*Cucumis melo*), sandía (*Citrullus lanatus*), frejol (*Phaseolus vulgaris*) y pimiento (*Capsicum annuum*) en una superficie de > 4 000 ha (MAGAP, 2014).

2.2.8.1. Relieves bajos

Esta unidad tiene relieves monótonos de planos a suavemente ondulados, con cimas anchas redondeadas y poco marcadas donde predominan los materiales limo-arcillosos y arcillosos sobre los que se han desarrollado suelos clasificados como Vertisoles (MAG y ORSTOM, 1978; Winckell y Zebrowski, 1997). El perfil modal de este suelo, clasificado como Aridic Haplusterts (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.39** y **Cuadro 2.29**), se caracteriza por presentar grietas, caras de deslizamiento (*slickensides*) y alto contenido de arcilla tipo 2:1, la profundidad efectiva es de solamente 40 cm, el pH es ligeramente inferior a 7 en el primer horizonte, pero aumenta a profundidad y presenta baja actividad microbiana, debido al bajo contenido de materia orgánica (0.7 %) y humedad (MAG y ORSTOM, 1978; Mejía, 1997; Winckell y Zebrowski, 1997; CLIRSEN, *et al.*, 2010a).



Figura 2.39. Perfil del suelo clasificado como Aridic Haplusterts (izquierda), ubicado en San Lorenzo, El Morro, Guayas, con una secuencia de horizontes Ass1/Ass2/Ck1/Ck2 en un relieve ondulado (pendiente < 12 %) (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2011i).

Los suelos de esta zona son fértiles, pero la falta de agua ha sido la principal limitante para la agricultura que se puede desarrollar con la utilización de riego (Mejía, 1997). Al momento, la disponibilidad de agua entregada por el transvase Chongón – San Vicente ha permitido utilizar esta zona con agricultura de alta producción (Empresa Pública del Agua, 2014).

Cuadro 2.29. Características del perfil del suelo clasificado como Aridic Haplusterts (CLIRSEN, *et al.*, 2011i).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ass1	0-14	Color en seco: gris muy oscuro (2.5Y 3/1); textura: franco arcillo arenosa; estructura: granular a bloques subangulares; densidad aparente: 1.6 g cm ⁻³ ; pH: 6.7; materia orgánica: 0.7 %; CIC: 36 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 99 %.
Ass2	14-40	Color en seco: gris muy oscuro (2.5Y 3/1); textura: franco arcillo arenosa; estructura: masiva a bloques subangulares; pH: 7.6; materia orgánica: 0.4 %; CIC: 36 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
Ck1	40-75	Color en seco: gris muy oscuro (2.5Y 3/1); textura: franco arcillosa; estructura: masiva; pH: 8.4; materia orgánica: 1.9 %; CIC: 36 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
Ck2	75-105	Color en seco: gris muy oscuro (2.5Y 3/1); textura: franco arcillosa; estructura: masiva; pH: 7.9.

2.2.8.2. Relieves altos

Los relieves altos están formados de areniscas y conglomerados con altitudes que no sobrepasan los 275 m s. n. m. (Winckell y Zebrowski, 1997). Los suelos de esta zona son poco evolucionados debido a que los procesos erosivos son superiores a los procesos de pedogénesis y, por esta razón, se caracterizan por tener un perfil poco profundo como lo evidencia el perfil modal que se presenta en la **Figura 2.40** y en el **Cuadro 2.30**. Este suelo, clasificado como Typic Ustorthents (Soil Survey Staff, 2006), presenta un estrato rocoso ligeramente meteorizado a menos de 40 cm de profundidad. La textura superficial es franco arenosa y de color pardo oscuro (10YR 3/3). Desde el punto de vista químico, el suelo tiene pH neutro, muy bajo contenido de materia orgánica (0.7 %), alta CIC (26 cmol kg⁻¹) y alto porcentaje de saturación de bases (95 %) (CLIRSEN, *et al.*, 2012b). Son suelos que tienen poco espacio para el desarrollo radicular debido que están ubicados en pendientes medias a fuertes, es decir, son susceptibles a procesos erosivos, razón por la cual no son utilizados para la agricultura (CLIRSEN, *et al.*, 2012a).



Figura 2.40. Perfil del suelo clasificado como Typic Ustorthents (izquierda), con una secuencia de horizontes A/AC/C, ubicado en El Azúcar, Santa Elena, Santa Elena. El sitio se localiza en un relieve colinado medio (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2012b).

Cuadro 2.30. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Ustorthents (CLIRSEN, *et al.*, 2012b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-15	Color en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, con presencia común de fragmentos gruesos de tipo piedras; pH: 7.0; materia orgánica: 0.7 %; CIC: 26 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 95 %.
AC	15-40	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, con presencia común de fragmentos gruesos del tipo piedras; pH: 7.0; materia orgánica: 0.4 %.
C	40-100	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 5/6); textura en campo: areno francosa; estructura: roca; pH en campo: 6.8; materia orgánica: 0.4 %.

2.2.8.3. Grandes glacis de esparcimiento

Esta unidad corresponde a los glacis muy disectados que se localizan principalmente alrededor del gran cerro de Chanduy-Playas, sitio donde se dibuja una corona bastante regular y continua que baja progresivamente desde los 100-80 m s. n. m. hasta entrar en contacto con los relieves bajos. Estos glacis están

compuestos de materiales coluvio-aluviales esparcidos sobre los cuales se desarrollaron suelos fersialíticos y pedregosos de matriz areno-arcillosa, rojiza que presentan una marcada cimentación ferruginosa secundaria que debió desarrollarse en condiciones climáticas diferentes a las actuales, ya que se necesita de un clima más húmedo para la liberación, circulación y cristalización de los óxidos metálicos (MAG y ORSTOM, 1978; Winckell y Zebrowski, 1997).

El perfil de un suelo representativo de esta zona se presenta en la **Figura 2.41** y en el **Cuadro 2.31**. Este suelo se clasifica como Sodic Haplocambids (Soil Survey Staff, 2006). La profundidad efectiva es de 22 cm. Según el promedio ponderado de los dos primeros horizontes, existe un bajo nivel de materia orgánica (0.1 %), 34 cmol kg⁻¹ de CIC y un alto porcentaje de saturación de bases (93 %) (CLIRSEN, *et al.*, 2011g). En estos suelos es casi imposible la producción agrícola por el clima muy seco y la extrema salinidad del suelo (~ 20 dS m⁻¹).



Figura 2.41. Perfil del suelo clasificado como Sodic Haplocambids (izquierda) ubicado en Cerro El Morro, Guayaquil, Guayas, con una secuencia de horizontes A/C1/C2/2C3/3C4/4C5. El sitio está ubicado en un valle fluvial (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2011g).

Cuadro 2.31. Características del perfil del suelo clasificado como Sodic Haplocambids (CLIRSEN, *et al.*, 2011g).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-22	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2), con moteados de color pardo fuerte (7.5 YR 5/6) y color en seco: pardo fuerte (7.5YR 5/6); textura: franco limosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.6; CE: 20 dS m ⁻¹ ; materia orgánica: 1.5 %; CIC: 38 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
C1	22-40	Color en húmedo: gris muy oscuro (10YR 3/1); textura: franco arcillosa; sin estructura (masiva); pH: 7.1; CE: 20 dS m ⁻¹ ; materia orgánica: 0.3 %; CIC: 29 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 97 %.
C2	40-51	Color en húmedo: gris muy oscuro (2.5Y 3/1); textura: franco arcillosa; sin estructura (masiva); pH: 7.2; CE: 17 dS m ⁻¹ ; materia orgánica: 0.3 %; CIC: 30 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 96 %.
2C3	51-64	Color en húmedo: negro (5Y 2.5/2); textura: franco arcillo arenosa; sin estructura (masiva); pH: 7.7; CE: 18 dS m ⁻¹ ; materia orgánica: 0.1 %.
3C4	64-82	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (2.5Y 4/2); textura: franco arenosa; sin estructura (masiva); pH: 7.2; CE: 17 dS m ⁻¹ ; materia orgánica: 0.1 %.
4C5	82-110	Color en húmedo: gris muy oscuro (5Y 3/1); textura: franco arcillosa; sin estructura (masiva); pH: 7.6; CE: 17 dS m ⁻¹ ; materia orgánica: 0.3 %.

2.2.9. Cordillera Chongón Colonche

La cordillera Chongón Colonche, una estructura en forma de arco, se extiende desde el Membrillar hasta Guayaquil (**Figura 2.42**), constituyéndose en el macizo más importante e imponente de la costa con su punto más alto a 830 m s. n. m. Los relieves más altos (macizos disectados) se asientan sobre afloramientos volcánicos y volcánico-sedimentarios, mientras que los relieves monocinales, más o menos erguidos, se desarrollaron sobre los estratos sedimentarios asociados con modelados suaves, abruptos y zonas fuertemente disectadas. Lo anterior explica la disimetría marcada de la cordillera, la falda sur es bastante disectada y tiene una pendiente empinada mientras que la vertiente noreste consiste en una sucesión de relieves monocinales suavemente inclinados (Winckell y Zebrowski, 1997). La gradiente altitudinal influye marcadamente en el clima de esta unidad. En las zonas bajas, la precipitación media anual es inferior a los 500 mm (10 a 12 meses secos), mientras que, en las partes altas, la precipitación es del orden de 1 000 mm (4 a 8 meses secos). Asimismo, existe un fuerte contraste entre las dos extremidades de la cordillera, en el cuerno norte, cercano a la costa, las condiciones son más secas (400 mm de precipitación media anual), mientras que en el cuerno sur la precipitación es cercana a 1 000 mm. La zona tiene una temperatura media anual de 25 °C, con una diferencia de 3 °C entre las temperaturas medias mensuales extremas (Winckell y Zebrowski, 1997).

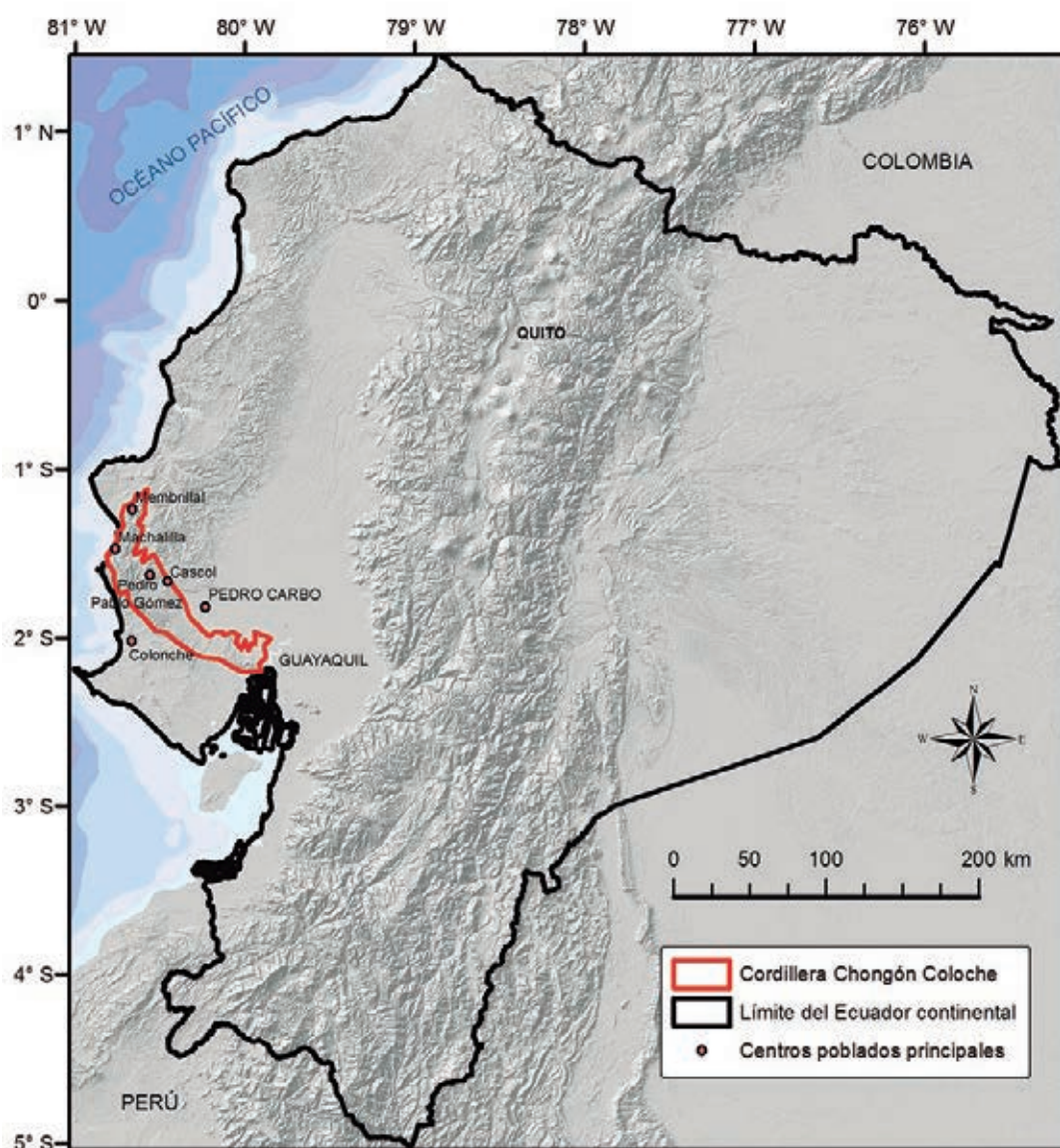


Figura 2.42. Ubicación de la cordillera Chongón Colonche con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell and Zebrowski (1997).

En esta zona no existe producción agropecuaria significativa debido a los relieves de fuertes pendientes, la compacidad de sus modelados y, en general, por la presencia de suelos poco profundos y severas condiciones de sequía. Las zonas secas se aprovechan para el pastoreo ambulante de bovinos, caprinos y ovinos. Los paisajes más elevados y de clima más húmedo se utilizan para el cultivo marginal de cítricos (*Citrus* sp.) y café (*Coffea arabica*). En las partes planas y de modelados moderados se desarrolla la mayor actividad agropecuaria de la zona con cultivos como café, banano (*Musa paradisiaca*), cacao (*Theobroma cacao*) y cítricos que se han asociado con la producción de ganado bovino (Winckell y Zebrowski, 1997). Sin embargo, en los últimos años se ha desarrollado la producción de cacao y café mediante el trabajo comunal de los agricultores de la zona (Bonifaz, *et al.*, 2004; ACBIO, 2012).

Debido a esta diversidad de relieves y la disposición particular de los diferentes paisajes, en esta cordillera se diferencian, en forma general, cuatro grandes conjuntos de suelos: a) relieves poco profundos, generalmente sobre roca; b) relieves altos; c) relieves bajos; y d) áreas aluviales.

2.2.9.1. Suelos poco profundos, generalmente sobre rocas

Los suelos de esta zona, en el corazón de la cordillera, se desarrollaron sobre rocas volcánicas antiguas (lavas básicas, tobas, brechas) que reaparecieron por severos movimientos tectónicos que provocaron grandes fallas en el relieve. Estas rocas tienen gran resistencia a la meteorización y, además, como están localizadas en zonas secas y muy secas solo alcanzan a desarrollar alteraciones poco profundas, arcillo-pedregosas, con numerosos afloramientos de bloques rocosos en superficie (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997).

Un perfil de un suelo característico de esta zona, clasificado como Typic Haplusterts (Soil Survey Staff, 2006), se presenta en la **Figura 2.43** y en el **Cuadro 2.32**. El suelo está ubicado en una superficie con pendiente general del 25-40 %, con un régimen de humedad y temperatura del suelo caracterizado como ústico e isohipertérmico, respectivamente. Morfológicamente, el perfil del suelo es tipo A/ACss. La textura superficial es franco arcillosa. El suelo se caracteriza por presentar grietas profundas y caras de deslizamiento o fricción (slickensides) relacionadas con el alto contenido de arcilla 2:1 (principalmente montmorillonita). El pH del suelo, en el primer horizonte, es de 7.7, con un contenido de materia orgánica de 4.0 %, saturación de bases del 96 % y CIC de 35 cmol kg⁻¹ (CLIRSEN, *et al.*, 2010f).



Figura 2.43. Perfil del suelo clasificado como Typic Haplusterts ubicado en Sabanilla, Pedro Carbo, Guayas, donde predomina vegetación seca (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2010f).

Cuadro 2.32. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Haplusterts (CLIRSEN, et al., 2010f).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-11	Color en seco: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franco arcillosa; muchos fragmentos del tipo grava gruesa; pH: 7.7; materia orgánica: 4.0 %; CIC: 35 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 96 %.
ACss	11-55	Color en seco: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: de campo arcillosa y muchos fragmentos del tipo grava gruesa.

2.2.9.2. Relieves altos

Son los relieves más imponentes y altos de la cordillera derivados y constituidos por el complejo volcano-sedimentario de areniscas, grauvacas, facies silíceas intercaladas de lava y de pillow-lavas (Formación Cayo) que terminan en la parte superior por las series silicificadas y cherts de la Formación Guayaquil. Los macizos centrales, con los puntos más elevados de la cordillera (entre 500 y 800 m s. n. m.) se caracterizan por presentar grandes vertientes rectilíneas, pendientes fuertes a muy fuertes (> 70 %) en la parte norte, mientras que la totalidad de la falda suroccidental está constituida por relieves vigorosos, cuyas altitudes se elevan de 200 m s. n. m. hasta culminar a 830 m s. n. m. Estos relieves constituyen un verdadero frente montañoso que bloquea la circulación atmosférica, generando precipitaciones orográficas que han alterado la roca formando suelos con características móllicas, con régimen de humedad údico, que colindan con afloramientos rocosos y pedregosos (Winckell y Zebrowski, 1997; Zebrowski y Sourdat, 1997).

Debido a las condicionantes ambientales antes citadas, el perfil modal representativo de esta zona corresponde a un suelo clasificado como Typic Hapludolls (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.44** y **Cuadro 2.33**). Este suelo está localizado en una pendiente fuerte, caracterizado por ser poco profundo (45 cm) y por tener textura franca dentro de los primeros 10 cm de profundidad. El régimen de humedad del suelo es údico y el de temperatura isohipertérmico. Morfológicamente, presenta una secuencia de horizontes del tipo A/AB/Bw/C/Cr (MIDENA, *et al.*, 2012a).



Figura 2.44. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludolls (izquierda) ubicado en El Tamarindo, Puerto López, Manabí. El sitio muestra relieves altos con fuertes pendientes (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2012a).

Cuadro 2.33. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Hapludolls (MIDENA, *et al.*, 2012a).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-10	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) y color en seco: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franca; estructura: granular a bloques subangulares; pH: 7.5; materia orgánica: 4.5 %.
AB	10-20	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) y color en seco: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; pH: 7.6; materia orgánica: 3.2 %.
Bw	20-45	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) y color en seco: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franca; estructura: bloques subangulares; pocos fragmentos gruesos de tipo grava fina; pH: 8.1; materia orgánica: 2.3 %; CIC: 50 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 94 %.
C	45-75	Color en húmedo: pardo grisáceo (10YR 5/2) y color en seco: pardo pálido (10YR 6/3); textura de campo: franco arenosa; sin estructura (masiva).
Cr	75-110	Color en húmedo: pardo oliva (2.5Y 4/4) y color en seco: amarillo oliva (2.5 Y 6/6); textura de campo: franco arenosa; estructura: estratificada.

2.2.9.3. Relieves bajos

Los suelos de los relieves bajos están ubicados en las colinas muy suaves, con desnivel relativo entre 15 a 25 m, formadas a partir de arcillas arenosas y limolitas, más o menos cementadas, que se extienden en una aureola de relieves generalmente ubicados entre los 40 y 80 m s. n. m. cerca de la llanura y que luego se elevan progresivamente hasta los 80-100 m s. n. m. al norte de Pedro Carbo y 200 m s. n. m. en Cascol. Estos paisajes de colinas deprimidas y paisajes ondulados, localizados por debajo de los relieves sedimentarios terciarios de cuevas arenosas y de conglomerados de la cordillera, presentan vertientes suaves convexo-cóncavas y cimas rebajadas, anchas y aplanadas con pendientes entre 12 a 25 %. Las alteraciones de la roca sobre estos relieves monótonos muy suaves han desarrollado suelos arcillosos a arcillo-limosos, medianamente profundos, puesto que el clima es relativamente seco (Winckell y Zebrowski, 1997; CLIRSEN, *et al.*, 2011b).

Un perfil modal propio de estos relieves de colinas bajas es el del suelo clasificado como Calcic Haplusterts (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.45** y **Cuadro 2.34**), de régimen de humedad ústico y de temperatura isohipertérmico. Los horizontes tienen una secuencia Ap/Bss/Bk/C. En los primeros 32 cm de profundidad el pH es de 7.6, la materia orgánica de 2.1 %, la CIC de 30 cmol kg⁻¹ y la saturación de bases del 94 % (CLIRSEN, *et al.*, 2010g).



Figura 2.45. Perfil del suelo clasificado como Calcic Haplusterts (izquierda), ubicado en El Cadecito, Pedro Carbo, Guayas, en un relieve colinado medio (pendiente local < 8 %) (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2010g).

Cuadro 2.34. Características del perfil del suelo clasificado como Calcic Haplusterts (CLIRSEN, *et al.*, 2010g).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-32	Color en húmedo: negro (10YR 2/1) y color en seco: pardo gris rojizo oscuro (10R 3/1); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares, con muy pocos fragmentos gruesos tipo piedras; pH: 7.6; materia orgánica: 2.1 %; CIC: 30 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 95 %.
Bss	32-70	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura: arcillosa; estructura: columnar, con muy pocos fragmentos gruesos tipo piedras; pH: 7.2; materia orgánica: 1.2 %; CIC: 30 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 97 %.
Bk	70-92	Color en húmedo: amarillo parduzco (10YR 6/8); textura: franco arcillosa; estructura: masiva, con muy pocos fragmentos gruesos tipo piedras; pH: 7.6; materia orgánica: 0.9 %; CIC: 30 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 96 %.
C	92-103	Color en húmedo: amarillo parduzco (10YR 6/8); textura franco limosa; estructura: masiva a desmenuzable, con muy pocos fragmentos gruesos tipo piedras; pH: 7.8; materia orgánica: 0.9 %.

2.2.9.4. Medio aluvial

Los suelos de las áreas aluviales corresponden a los valles fluviales con complejos de terrazas (baja, medias y altas), ubicados principalmente entre la parte baja de la cordillera y el contacto con la llanura aluvial reciente al sureste de Pedro Carbo. Tienen suelos de textura variable, generalmente limosos aguas arriba de los valles y más arcillosas aguas abajo donde se utilizan para pastos y cultivos de plátano, maíz y yuca (*Manihot esculenta*), pero actualmente se han desarrollado los cultivos de cacao y café con las comunas de la región (Bonifaz, *et al.*, 2004; ACBIO, 2012).

Un perfil modal característico pertenece a un suelo clasificado como Vertic Ustifluents (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 2.46** y **Cuadro 2.35**) localizado en un valle fluvial de depósitos aluviales con pendientes del 2 al 5 %. Este suelo tiene un régimen de humedad ústico y régimen isohipertérmico de temperatura. Morfológicamente, presenta un perfil con secuencia de horizontes A/C/2Ab/2C/3Ab. La textura en la superficie es franco limosa y arcillosa a profundidad. Los colores van de pardo grisáceo, en el primer horizonte, a pardo y a gris muy oscuro, en los dos siguientes horizontes, respectivamente. El pH del primer horizonte (0-25 cm) es de 6.9, la materia orgánica de 2.7 %, la saturación de bases del 91 % y la CIC de 28 cmol kg⁻¹ (CLIRSEN, *et al.*, 2010b).



Figura 2.46. Perfil del suelo clasificado como Vertic Ustifluents (izquierda), ubicado en El Paraíso, Pedro Carbo, Guayas (derecha) (CLIRSEN, *et al.*, 2010b).

Cuadro 2.35. Características del perfil del suelo clasificado como Vertic Ustifluvents (CLIRSEN, *et al.*, 2010b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-25	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2), con moteado pardo amarillento (10YR 5/6) y color en seco: pardo grisáceo (10YR 5/2); textura: franco limosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.9; materia orgánica: 2.7 %; CIC: 28 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 91 %.
C	25-30	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3), con moteado pardo fuerte (7.5YR 4/6); textura: franco limosa; estructura: laminar; pH: 6.4; materia orgánica: 2.2 %; CIC: 24 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 95 %.
2Ab	30-40	Color en húmedo: gris muy oscuro (7.5YR 3/1), con moteado pardo fuerte (7.5YR 5/8); textura: de campo arcillosa; estructura: bloques subangulares y presencia común de revestimientos de manganeso.
2C	40-55	Color en húmedo: pardo grisáceo (10YR 5/2), con moteado pardo fuerte (7.5YR 5/8); textura de campo: arcillo limosa; estructura: laminar.
3Ab	55-65	Color en húmedo: principal pardo gris muy oscuro (7.5YR 3/1), con moteado pardo fuerte (7.5YR 4/6); textura de campo: arcillosa; estructura: masiva a bloques subangulares y presencia común de revestimientos de manganeso.

2.3. Referencias Bibliográficas

- ACBIO. 2012. Plan de acción del biocorredor Chongón Colonche. FIDES, SGP, GEF, UNDP. Guayaquil, Ecuador.
- Alto, K. and W. Miller. 1999. Sedimentology of the Pliocene Upper Onzole Formation, an inner-trench slope succession in northwestern Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences* 12: 69-85.
- Bonifaz, C., R. Elao, M. Santos, J. Avilés y X. Cornejo. 2004. Plan general de manejo del bosque protector de la cordillera Chongón Colonche. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.
- CLIRSEN, SENACYT, MAGAP y SIGAGRO. 2009a. Memoria técnica de suelos del cantón Colimes. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales en la cuenca del río Guayas escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kEqdbX>
- CLIRSEN, SENACYT, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009b. Memoria técnica de suelos del cantón Babahoyo. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales en la cuenca del río Guayas escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lVlv8Q>
- CLIRSEN, SENACYT, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009c. Memoria técnica de suelos del cantón Samborondón. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales en la cuenca del río Guayas escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kRWBrA>
- CLIRSEN, SENACYT, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009d. Memoria técnica de suelos del cantón Vinces. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales en la cuenca del río Guayas escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lWmCpO>
- CLIRSEN, SENACYT, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009e. Panorámica del perfil CG4-P009. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lUIkdY>

- CLIRSEN, SENACYT, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009f. Perfil CG2-P029. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2IW6YL8>
- CLIRSEN, SENACYT, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009g. Perfil CG2-P035. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2koxV9X>
- CLIRSEN, SENACYT, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009h. Perfil CG3-P045. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kooW8B>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011a. Memoria técnica de geopedología del cantón Salinas. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kQzmOs>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011b. Memoria técnica de geopedología y amenazas geológicas del cantón Pedro Carbo. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1 : 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kTnFqh>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011c. Memoria técnica de geopedología y amenazas eológicas del cantón Pedro Carbo. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1 : 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lYkBtd>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011d. Perfil CG1-P180. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lW7vN8>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011e. Perfil CG3-P146. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2moIZEF>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011f. Perfil CG3-P193. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2m1dD6E>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011g. Perfil CG4-P228. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2moM1Zy>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011h. Perfil CG5-P171. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kEr5xf>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011i. Perfil CG6-P173. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lXKtFL>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2012a. Memoria técnica de geopedología del cantón Santa Elena. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lVJm9y>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2012b. Perfil PN2-P004. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kozsNf>

- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2012c. Perfil PN8-P011. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2mpwxEN>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2011j. Memoria técnica de la geopedología del cantón Montecristi. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2mk0rKk>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009i. Memoria técnica de clima e hidrología. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales en la cuenca del río Guayas escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2mpuf8F>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2010a. Memoria técnica de clima, hidrología y amenazas hidrometeorológicas. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lYkbTF>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2010b. Perfil CG1-P092. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lYkkXd>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2010c. Perfil CG1-P109. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2mnBcHc>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2010d. Perfil CG1-P115. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2krkfuT>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2010e. Perfil CG2-P061. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2m39Buv>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2010f. Perfil CG4-P129. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lWnivm>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2010g. Perfil CG5-P097. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2krAEM>
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2010h. Perfil CG6-P115. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2krkfuT>
- Collot, J., F. Michaud, A. Alvarado, B. Marcaillou, M. Sosson, G. Ratzov, *et al.* 2009. Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia: implicaciones sobre a transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie. In: Comisión Nacional del Derecho del Mar (CNDM) (ed) Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador desde la costa continental hasta las islas Galápagos. CNDM-IRD-INOCAR. Guayaquil, Ecuador.
- Empresa Pública del Agua. 2014. Tránsito desde canal Chongón - sube y baja a la presa San Vicente en el cantón Santa Elena de la provincia de Santa Elena. EPA. Guayaquil, Ecuador.
- Huttel, C. 1997. Las grandes regiones climáticas y sus formaciones vegetales naturales En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebronski y M. Sourdat (eds). Paisajes naturales del Ecuador: las condiciones generales del medio natural. CEDIG - IPGH - IRD - IGM. Quito, Ecuador.

- Huttel, C., C. Zebronski, P. Gondard y J. Bourliaud. 1999. Paisajes agrarios de Ecuador. IFEA-IGM-IPGH-RD-PUCE. Quito, Ecuador.
- IGM. 2019a. Geoportal de Instituto Geográfico Militar. Disponible en <http://bit.ly/2qMvOPR>
- IGM. 2019b. Geovisualizador Instituto Geográfico Militar. Mosaico de Geopedología 1:25.000. Disponible en <https://bit.ly/2ITzM6Z>
- IGM. 2019c. Geovisualizador Instituto Geográfico Militar. Mosaico de Uso de la Tierra 1:25.000. Disponible en <https://bit.ly/2ITzM6Z>
- INEC. 2019. Encuesta de superficie y producción agropecuaria. Disponible en <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/estadisticas-productivas>
- León, J. 2010. Manual de geografía del Ecuador. Universidad Andina Simón Bolívar, sede Ecuador - Corporación Editora Nacional. Quito Ecuador.
- MAG y ORSTOM. 1978. Inventario catográfico de la Costa ecuatoriana. MAG-PRONAREG. Quito, Ecuador.
- MAGAP. 2014. Proyecto PIDAASSE. Disponible en <https://bit.ly/2kQA5za>
- Mejía, L. 1997. Suelos del Ecuador: Reconocimiento general en base a su capacidad-fertilidad y mapa general de clasificación por Capacidad-Fertilidad de los suelos del Ecuador: Una interpretación básica sobre las características de los suelos del Ecuador. FFJMD-INPOFOS-IGM-IPGH-SECS. Quito, Ecuador.
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013a. Memoria técnica geopedológica del cantón Valencia. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2ksYAm2>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013b. Perfil PM2-P176. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kQailW>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013c. Perfil PM4-P203. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kTeKoK>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013d. Perfil PN2-P181. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lXBwMu>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013e. Perfil PN7-P204. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2koAkS1>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013f. Perfil PN8-P187. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2m3b2ZV>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2014. Perfil PM2-P213. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2ksYNFQ>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2015. Perfil PN4-P235. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2moNeQA>
- MIDENA, IEE, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2012a. Perfil PN6-P078. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2mnoTKX>

- MIDENA, IEE, SENPLADES, MAGAP y INIGEMM. 2012b. Perfil PM1-P064. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2mnoRmj>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013g. Perfil PM1-P131. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2m1kWLA>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013h. Perfil PN3-P151. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2m1kWLA>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas y INECA. 2012. Estudio de ingeniería de la carretera Santo Domingo-Esmeraldas y la estructuración jurídica, técnica y económico-financiera. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Quito, Ecuador.
- Moreno, J. 2001. Zonificación agroecológica de la cuenca baja del río Guayas-Ecuador con utilización de la Teledetección. Facultad de Ciencia Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ingeniero Agrónomo. Quito, Ecuador.
- Moreno, J. 2012. Fertilidad de los suelos a través de la regionalización de variables edafológicas mediante herramientas geoestadísticas en seis cantones del Ecuador. Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales. Universidad Mayor de San Simón. Maestría en Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra. Cochabamba, Bolivia.
- Pacheco, R. 2009. El Ecuador: Recursos naturales agrícolas y del medio ambiente. Imprenta Colón. Quito, Ecuador.
- PRONAREG-ORSTOM. 1982. Inventario cartográfico de la Sierra ecuatoriana: mapas de aptitudes agrícolas, escala 1: 200 000, Quito, Ecuador. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG), Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer (ORSTOM). Quito, Ecuador.
- Ramírez, M. 2013. Registros de la deformación y del volcanismo en el dominio del antearco ecuatoriano: sedimentología y bioestratigrafía de la formación Borbón. Facultad de Ingeniería en Ciencia de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ingeniero en Geología. Guayaquil Ecuador.
- Sánchez, D., C. Montúfar, E. Lagos y F. Yerovi. 2010. Caracterización de la dinámica ambiental, a escala de tiempo humano, en el cantón Milagro mediante el uso de herramientas geoespaciales. En: J. Espinosa (ed). XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, Ecuador. <https://bit.ly/2kHhfuy>
- Sevillano, G. 2010. Levantamiento geopedológico de la cuenca baja del río Guayas-Ecuador con aplicación del enfoque sistémico. En: J. Espinosa (ed). XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo: El suelo como factor de mitigación del cambio climático. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, Ecuador. <http://bit.ly/2lXJEg8>
- SIGTIERRAS. 2016a. Perfil CSp-NIV-E4-86-0055. SIGTIERRAS. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2m3bmYD>
- SIGTIERRAS. 2016b. Perfil CSp-NIV_C2-98-0043. SIGTIERRAS. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2m3bmYD>
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to soil taxonomy. 10th ed. USDA - NRCS. Washington DC, USA.
- Tapia, J. 2012. Modelización hidrológica de un área experimental en la Cuenca del Río Guayas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata. Maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Ciudad de la Plata, Argentina.

- Winckell, A., R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski, *et al.* (ed). 1997. Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador.
- Winckell, A. y C. Zebrowski. 1997. Los paisajes costeros. En: A. Winckell, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). Los paisajes naturales del Ecuador: Las regiones y paisajes del Ecuador. CEDIG-IPGH-IRD. Quito.
- Zebrowski, C. y M. Sourdat. 1997. Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador. En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador.

CAPÍTULO 3

—SUELOS— DE LA SIERRA

Julio Moreno, Instituto Geográfico Militar: vjmi76.jm@gmail.com

Fausto Yerovi, Ganadería El Pogyo: patoyerovi@gmail.com

Mireya Herrera, Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias: mireyaherrera18@hotmail.com

Darwin Yáñez, Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias:

darwinbeniyanez@yahoo.es

José Espinosa, Consultor: [jespinosa@fragaria.com.ec](mailto:jespিনosa@fragaria.com.ec)

Renato Haro, Consultor: renoharo@hotmail.com

RESUMEN

La Sierra está formada por las cordilleras oriental y occidental de los Andes arregladas en dirección norte-sur, con pendientes muy inclinadas en los flancos exteriores que gradualmente se reducen a medida que se difunden en la Costa o en la Amazonía. Además, existe también una reducción de masividad de las cordilleras en dirección norte a sur. La Sierra se divide en tres regiones: Sierra Norte, Sierra Centro y Sierra Sur. La Sierra Norte ha recibido la reciente contribución de erupciones volcánicas (ceniza y lapilli) sobre las cuales se han desarrollado Andisoles de diversa fertilidad, generalmente profundos, características que están directamente ligadas al clima y el material parental. La Sierra Centro no tiene volcanes activos o recientes proyecciones piroclásticas y el material parental consiste en cenizas antiguas y rocas metamórficas en un relieve monótono. En esta zona existe una variedad de suelos dependiendo de la altitud. En los sectores altos, los suelos son ferralíticos-fersialíticos, en la parte media son moderadamente evolucionados con características móllicas y vérticas y en la parte baja son suelos son pobremente desarrollados (Inceptisoles y Entisoles). La Sierra Sur se caracteriza por tener un relieve más irregular ubicado sobre sobre granitos, formaciones metamórficas, sedimentos terciarios y glaciares de depósitos coluviales que han formado, en la parte alta, suelos fersialíticos saturados ricos en arcillas 2-1, junto con Paleosoles ferralíticos desaturados. En las áreas bajas, los suelos son principalmente Vertisoles, a menudo pobremente desarrollados, rodeados por Paleosoles ferralíticos.

ABSTRACT

The Highlands are made of the western and eastern cordilleras arranged in a north–south direction, with very steep outer slopes which gradually decline as they diffuse into the coastal plain or the Amazonia. Additionally, there is a decreasing massiveness of the cordilleras also from north to south. The Highlands are divided into three regions: Northern, Central, and Southern Highlands. The Northern section of the Highlands received recent contributions of volcanic projections (ash and lapilli) over which diverse fertile and generally deep Andisols have developed, characteristics closely linked to climate and parent material. The Central Highlands do not have active volcanoes or recent pyroclastic projections and the parent material consists of old volcanic and metamorphic rocks in a monotonous relief. There is a variety of soils in this zone depending on the altitude. In the upper sectors, soils are ferralitic–fersialitic, in the middle, they are moderately evolved with mollic or vertic features, and in the lowland, soils are poorly developed (Inceptisols and Entisols). The Southern Highlands are characterized by a more rugged relief over granites, metamorphic formations, tertiary sediments, and glacial colluvial deposits that have formed, in the upper parts, fersialitic saturated soils rich in minerals 2:1, along with desaturated ferralitic Paleosols. In the lower areas, soils are mainly Vertisols, often poorly developed, surrounded by the ferralitic Paleosols

3.1. Introducción

La Cordillera de los Andes, la barrera montañosa más notoria en el Ecuador, tiene un ancho que varía entre 100 y 150 km de este a oeste y está conformada por las cordilleras Occidental y Oriental dispuestas en dirección meridiana. La masividad de los Andes en Ecuador se reduce de norte a sur y las vertientes exteriores de las cordilleras son muy abruptas y se caracterizan por una declinación general de altitud a medida que se difunden en las llanuras de la Costa o de la Amazonía. La Sierra se subdivide en tres regiones (**Figura 3.1**): a) Sierra Septentrional, que se extiende desde la frontera con Colombia hasta la latitud 2° 15' S (Palmira-Alausí), caracterizada por la presencia de varios volcanes, algunos activos y otros apagados; b) Sierra Central, que parte desde Palmira-Alausí hasta de Zaruma-Saraguro al sur, donde no existen volcanes recientes y el paisaje es el del típico altiplano ensanchado y monótono; y, c) Sierra Meridional, que se inicia desde Zaruma-Saraguro hasta la frontera con el Perú, con un relieve confuso de sitios bajos que se dirigen hacia el SSO y sitios más altos que apenas alcanzan los 2 500 m s. n. m. (Winckell, *et al.*, 1997b; IGM, 2013).

Las características de estas tres zonas se pueden sintetizar en los siguientes geosistemas (**Figura 3.2**): a) Cimas frías de las cordilleras andinas, con paisajes heredados y paisajes de páramo con climas fríos o muy fríos y heladas nocturnas cotidianas, con conos volcánicos de diferentes edades y suelos negros poco evolucionados con altos contenidos de materia orgánica. El clima no favorece la actividad agrícola, pero estas áreas se usan para pastoreo extensivo y localizado de ovinos; b) Vertientes externas de los Andes, con modelados vigorosos y muy disectados sobre rocas antiguas diversas. El clima es húmedo a muy húmedo con presencia de fuerte nubosidad, condiciones que han favorecido la formación de zonas arbóreas perennes. Los suelos son ferralíticos con cobertura parcial de cenizas volcánicas recientes y rejuvenecidos por la erosión; c) Cuencas interandinas del norte de la Sierra con rellenos volcano-sedimentarios, donde es evidente la morfogénesis volcánica promovida por la presencia de grandes estratovolcanes recientes y activos. Los suelos de esta zona se han desarrollado sobre recubrimientos piroclásticos generalizados y están sometidos a una intensa actividad agrícola; d) Cuencas interandinas del centro de la Sierra con basamento antiguo, volcánico y metamórfico, donde no existen volcanes ni recubrimientos piroclásticos recientes, el área está fragmentada en dos conjuntos de cuencas sedimentarias paralelas cuya cobertura está distribuida en una topo-climo secuencia donde los suelos de la parte alta son ferralíticos, a menudo humíferos, los de la zona media son moderadamente evolucionados con características móllicas o vérticas y los de la zona baja son poco evolucionados; e) Entalladuras y valles fluviales interandinos con suelos aluviales relativamente ricos en los valles y sobre los cuales existe actividad agrícola diversificada; f) Relieves de la Sierra Austral de suelos ferralíticos-fersialíticos, localizados en una paleo-topo-climo secuencia edafológica de grandes valles y depresiones ortogonales donde es clara la estratificación climática de húmedo a árido (Winckell, *et al.*, 1997b).

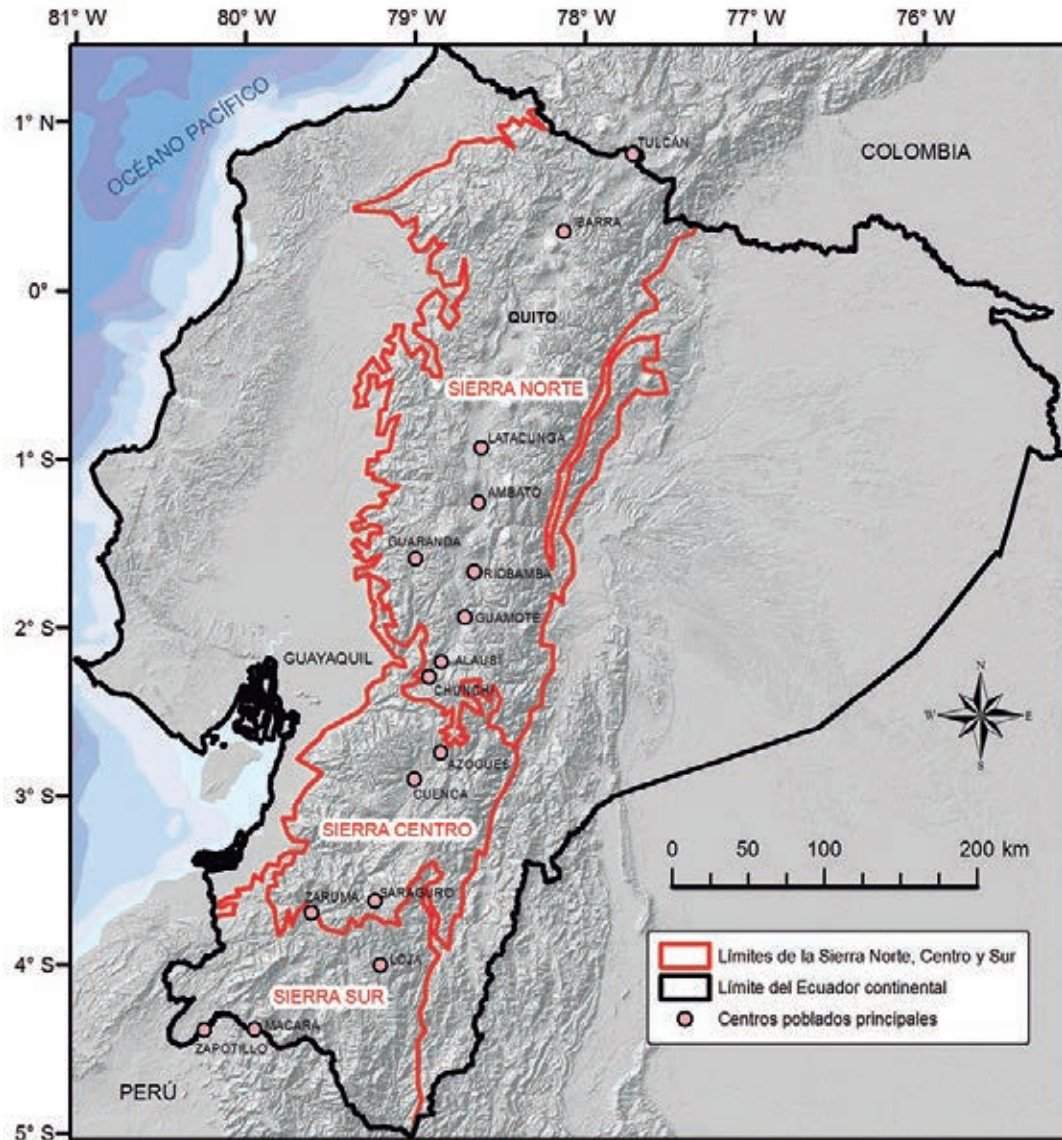


Figura 3.1. Ubicación de los Andes Septentrionales, Centrales y Meridionales, respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell, *et al.* (1997).

La cartografía de aptitudes agrícolas a escala 1: 200 000 publicada por PRONAREG-ORSTOM (1982) muestra que el 23 % de la tierra de la región Sierra (1.4 millones de ha) es apta para uso agrícola. Estas son tierras ubicadas en zonas planas a moderadamente onduladas de los valles intermontanos que presentan condiciones favorables para una amplia gama de cultivos de clima templado como papa, cebada, trigo, maíz, quinua, leguminosas, frutales y hortalizas. El 24 % (aproximadamente 1.5 millones de ha) corresponde a áreas muy disectadas con pendientes moderadamente pronunciadas, condición que hace que sean tierras marginales para uso agrícola, pero que pueden utilizarse para ganadería. Finalmente, el 53 % de la Sierra (3.4 millones de ha) corresponde a áreas que tienen pendientes muy pronunciadas y serias limitaciones climáticas y morfopedológicas para agricultura y ganadería (incluye los declives externos e internos de la Cordillera de los Andes) y que solamente pueden utilizarse para mantenimiento de la cobertura vegetal, forestación y reforestación (Pacheco, 2009).

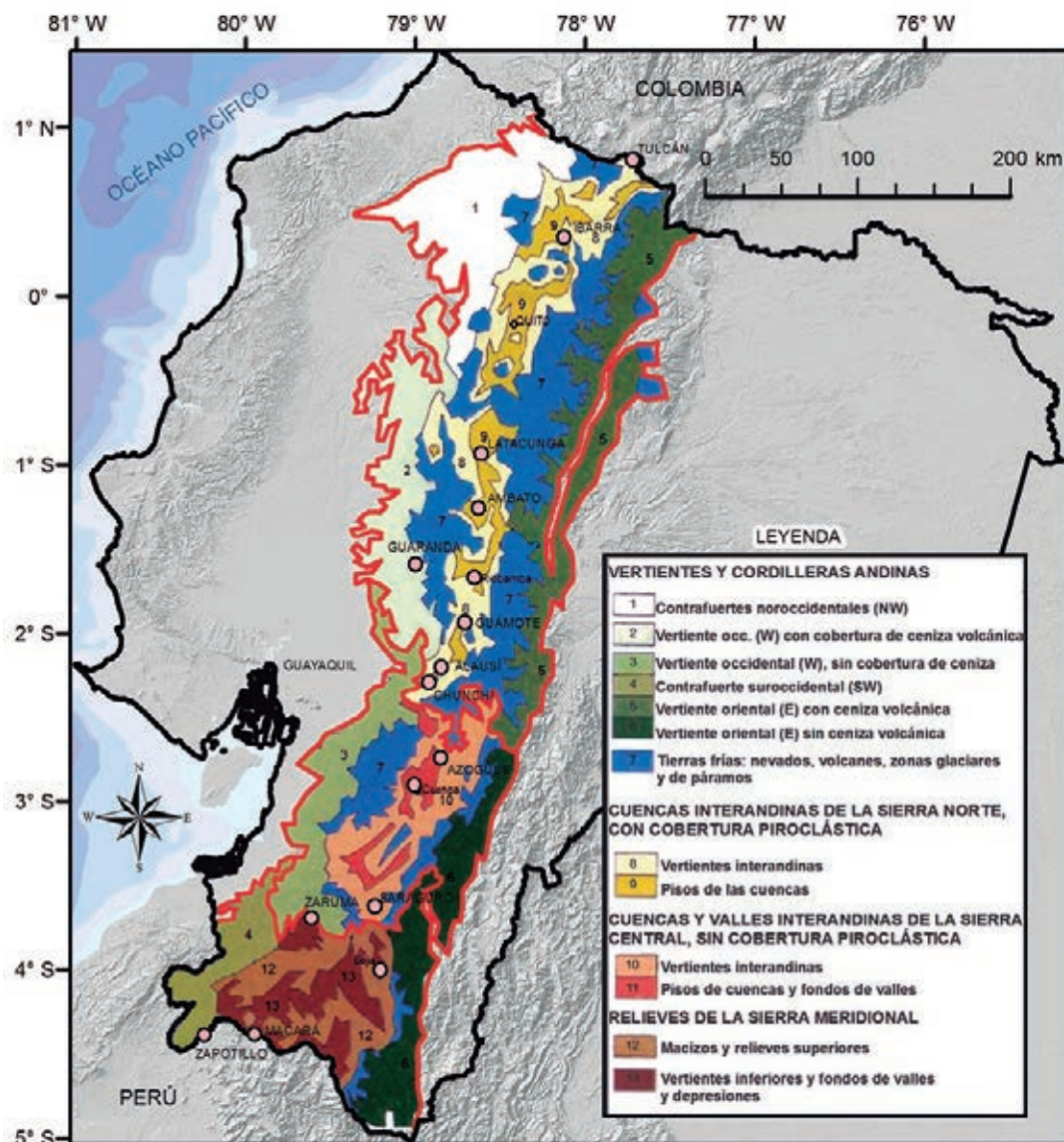


Figura 3.2. Ubicación de los diferentes geosistemas (paisajes) en la Sierra Septentrional, Central y Meridional con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell *et al.* (1997).

3.2. Características de la Sierra Norte

Los Andes Septentrionales o Sierra Norte se extienden desde el límite fronterizo con Colombia hasta la latitud $2^{\circ} 15' S$ en Palmira-Alausí (Figura 3.3). El paisaje de esta unidad se caracteriza por estar enmarcado por dos grandes cordilleras paralelas (oriental y occidental) que forman lo que Humboldt denominó Avenida de los Volcanes. Estos grandes macizos alcanzan altitudes de 4 000 a 4 500 m s. n. m. y están separadas por la depresión interandina que tiene una anchura de alrededor de 20 km y altitudes que oscilan entre los 1 600 a 3 000 m s. n. m. Además, son parte de esta unidad las vertientes externas muy empinadas que terminan fundiéndose con las regiones de la Costa y Amazonía. El volcanismo del periodo Cretáceo originó la Cordillera Oriental, mientras que la Cordillera Occidental se desarrolló sobre diversas fases del tectonismo de la orogénesis Andina (Winckell, *et al.*, 1997b; Pacheco, 2009).

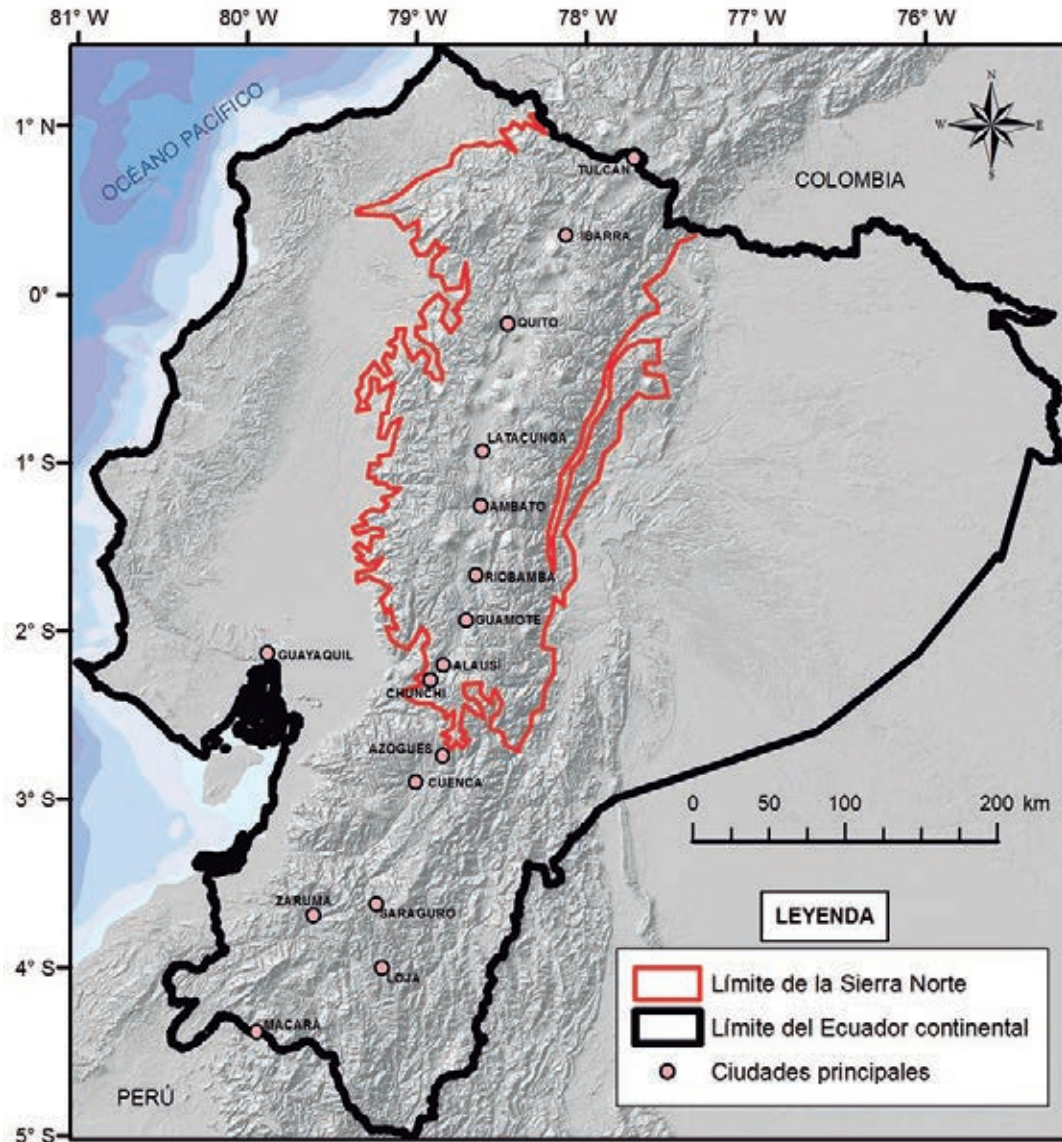


Figura 3.3. Ubicación de la Sierra Norte, respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell, *et al.* (1997b).

El intenso proceso volcánico generó grandes emisiones de piroclastos, coladas volcánicas y lahares que se depositaron sobre las andesitas y riolitas originales en la mayoría de la Sierra Norte. En esta zona de Ecuador se encuentran ubicados los volcanes, la mayoría sin actividad como los colosos Cotopaxi (5 897 m s. n. m.) y Chimborazo (6 310 m s. n. m.) (**Figura 3.4**). Los grandes volúmenes de ceniza volcánica depositada, especialmente sobre la cordillera occidental y la llanura costera, han suavizado las geoformas de estas zonas (Pacheco, 2009).

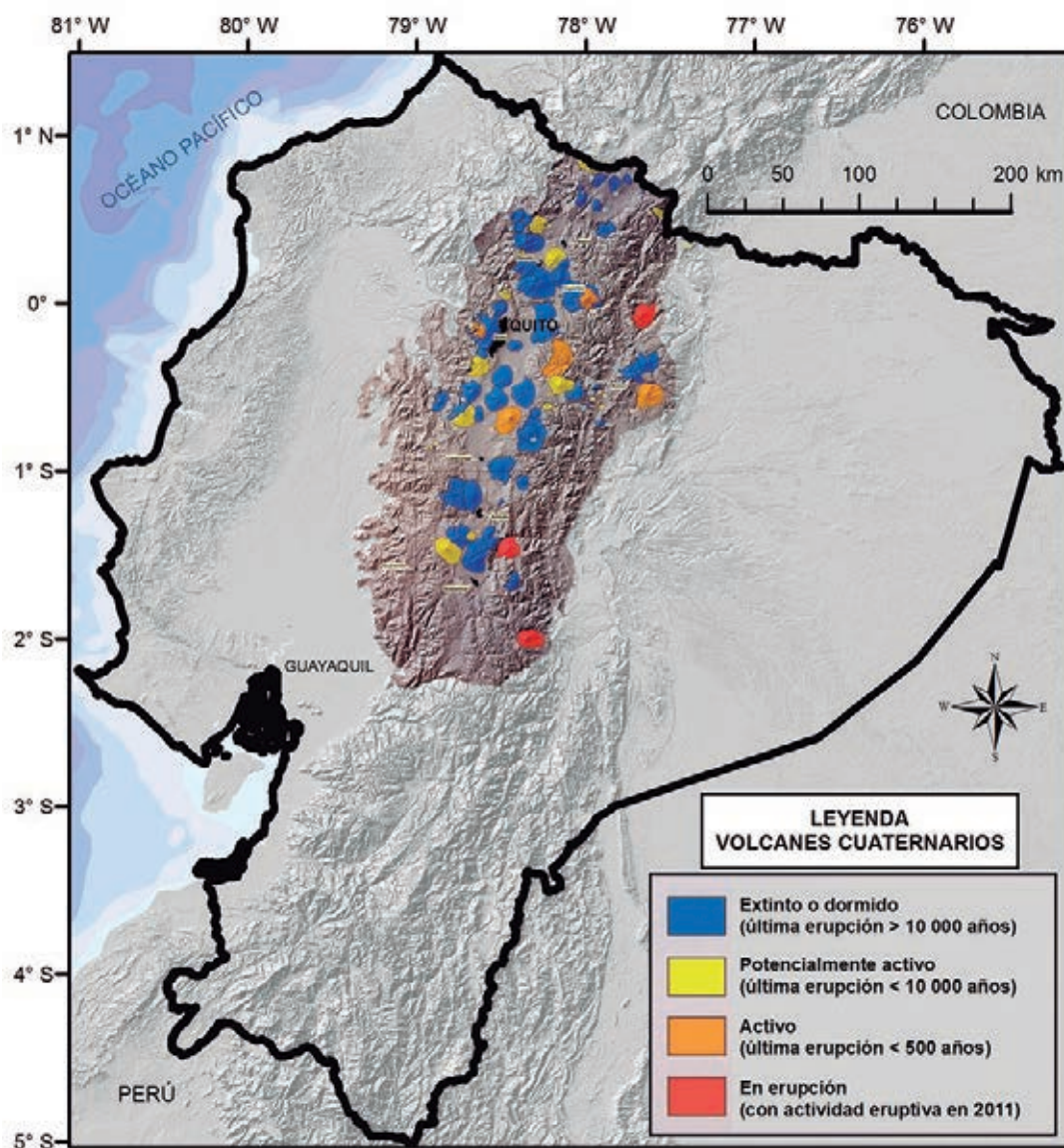


Figura 3.4. Zona de influencia de la actividad volcánica antigua y reciente en Ecuador. Adaptado de IRD, et al. (2012).

Las glaciaciones ocurridas en el Cuaternario, en combinación con la actividad tectónica, el volcanismo Cuaternario y los episodios de erosión y relleno dejaron marcadas sus huellas en los relieves y dieron forma a la geomorfología actual de los Andes Septentrionales. En medio de las dos cordilleras, como producto de fallas tectónicas, se formaron edificios volcánicos transversales denominados nudos. Los nudos dividen la depresión formada entre las cordilleras en pequeños valles (hoyas) característicos de la Sierra Norte (Pacheco, 2009). La Sierra Norte se divide en los siguientes relieves: a) Cimas frías, b) Flancos de los volcanes, c) Vertientes exteriores, d) Vertientes interiores, e) Relieves de fondo de cuenca y callejón interandino y f) Medio fluvial.

3.2.1. Cimas frías

Este paisaje andino, conocido también como Tierras Frías de los Andes, se caracteriza por presentar zonas frías en forma de dos cintas meridionales que coronan las cordilleras occidental y oriental en las cuales sobresalen los edificios volcánicos siempre cubiertos de nieve. Estos paisajes empiezan a 0° de latitud (San Antonio de Pichincha) aproximadamente a 3 600 m s. n. m. y en varios sitios alcanzan alturas que

permiten nieves perpetuas llegando a la cumbre máxima en el nevado del Chimborazo a 6 310 m s. n. m. (Winckell, *et al.*, 1997b). Según el diagrama de Holdridge, las cimas frías se encuentran entre los pisos altitudinales Subalpino, Alpino y Nival que denotan regiones latitudinales de Boreal a Subpolar y Polar (Holdridge, 1969; Cañadas, 1983).

Al terminarse en su totalidad las glaciaciones aparecieron los glaciares recientes generando de manera armónica la morfología glaciaria actual caracterizada por valles glaciares, morrenas y acantilados rocosos. La topografía es irregular con vertientes abruptas y llanos planos con un modelaje suavizado por la ceniza volcánica (Winckell, *et al.*, 1997b).

La cordillera occidental es de origen reciente y se formó como resultado del choque y aplastamiento de los arcos volcánicos que al momento de la elevación de la costa ecuatoriana se encontraban obstruidos por las cortezas oceánica y continental. La cordillera oriental, o cordillera original, se formó como resultado de actividad antigua del Precámbrico y/o Paleozoico (Winckell, *et al.*, 1997b), aunque estudios recientes indican que las rocas sedimentarias y magmáticas que cubren esta cordillera se formaron en el Mesozoico (Vallejo, 2007). Las cordilleras se cubrieron con glaciares, en mayor cantidad en la cordillera oriental debido al mayor volumen de pluviosidad generado por las grandes masas de aire de origen Amazónico (Derruau y de Noni, 1982).

La condición climática es la principal característica que diferencia esta zona de los demás paisajes andinos. La presión atmosférica es baja, la humedad es alta, el régimen de humedad del suelo es údico y perúdic, las temperaturas ambientales son bajas ($< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio), el régimen de temperatura en el suelo es en general isofrígido, es decir, la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad es $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y las precipitaciones anuales promedian 250 a 500 mm en las provincias de Cotopaxi y Tungurahua, 500 a 1 000 mm en las provincias de Imbabura y Chimborazo y 1 000 a 2 000 mm en las provincias de Pichincha, Carchi y Bolívar (Cañadas, 1983; Winckell, *et al.*, 1997b).

El paisaje de las cimas frías se caracteriza por presentar ecosistemas autónomos denominados páramos que se inician sobre la línea de bosques andinos y que llegan a las nieves perpetuas. Los páramos captan y administran agua dulce que drena de manera sistemática a través de la cobertura vegetal y del suelo formando coluvios aluviales por donde fluye el líquido vital hacia las zonas bajas, situación que permite la vida y la producción agropecuaria (Poulenard, *et al.*, 2003; Beltrán, *et al.*, 2009). En estas cimas se ubican las líneas divisoras de aguas (*divortium aquarum*) que dan origen a las cuencas hidrográficas (grandes y pequeñas) de la actualidad (Winckell, *et al.*, 1997b).

En su mayoría, la vegetación de los páramos se caracteriza por la presencia de pajonales de altura (*Stipa ichu*) que paulatinamente se reduce a medida que se alcanzan zonas de mayor altitud donde se observa mayormente una vegetación de arbustos postrados como los cojines o almohadillas (*Plantago rigida*) con remanentes de bosques primarios de *Polylepis*. Dependiendo de la zona geográfica (disponibilidad de agua, clima y volcán de origen) se pueden diferenciar las unidades ambientales características de los Andes del Norte con coberturas vegetales propias de cada zona, como los frailejones (*Espeletia pycnophylla*) en Carchi (**Figura 3.5**) (Beltrán, *et al.*, 2009; de Bievre, *et al.*, 2011).



Figura 3.5. Modelado volcánico de las cimas frías (izquierda) (foto de Freddy Guerrero) y cobertura de paja de páramo de *Stipa ichu* y frailejones (*Espeletia pycnophylla*) (derecha) (foto de Renato Haro).

Por su composición, los depósitos volcánicos de las Cimas Frías se alteraron rápidamente y la gran acumulación de humus, con habilidad para acomplejar aluminio (Al), permitió la formación de complejos humus-Al estables. Este fuerte acomplejamiento del Al con el humus limita la posibilidad de coprecipitación del Al con el silicio (Si) liberados de la descomposición de la ceniza volcánica, lo que a su vez limita la formación de alófana. Por esta razón, los suelos de altura de la Sierra Norte están dominados por complejos humus-Al y tienen muy poca alófana (Wada y Kakuto, 1985; Sollins, 1991; Poulencard, *et al.*, 2003; Zehetner, *et al.*, 2003). Estos suelos se caracterizan por tener colores oscuros, alto contenido de carbono, baja saturación de bases, baja densidad aparente, textura franca, franco arenosa o principalmente franco limosa, con una apariencia al tacto en campo untuosa y jabonosa, similar a limo, pH ácido y alta cantidad de aluminio libre (Al^{3+}) (MIDENA, *et al.*, 2013y).

Los suelos representativos de las Cimas Frías están clasificados, en su mayoría, como Cryands (Soil Survey Staff, 2006). En la **Figura 3.6** y en el **Cuadro 3.1** se describen las características de un suelo clasificado como Typic Melanocryands. Este tipo de suelos se encuentra ubicado sobre rocas aborregadas o flujos de lava de pendientes medias a fuertes. Los horizontes son profundos de colores negros y altos porcentajes de materia orgánica, ricos en potasio (K) y bajos en fósforo (P). La secuencia de horizontes en el perfil es la siguiente: A/A2 (MIDENA, *et al.*, 2014e).



Figura 3.6. Perfil del suelo clasificado como Typic Melanocryands (izquierda) ubicado en Cueva del Zorro, Tufiño, Carchi, cubierto con pajonales de altura (*Stipa ichu*) y frailejones (*Espeletia pycnophylla*) (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2014e).

Cuadro 3.1. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Melanocryands (MIDENA, *et al.*, 2014e).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A1	0-60	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF; densidad aparente: 0.39 g cm^{-3} ; pH: 5.3; materia orgánica: 25.7 %; CIC: 26 cmol kg^{-1} ; saturación de bases: 6.7 %.
A2	60-110	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco limosa; estructura bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF.

En las Cimas Frías se encuentran también suelos clasificados como Melanocryands y Fulvicryands, taxonómicamente muy jóvenes, muy profundos (en ciertas zonas la profundidad del perfil es mayor a 6 m), alto contenido de carbono orgánico (CO), pero con diferencias de color posiblemente debidas a la dominancia de ácidos húmicos o ácidos fúlvicos. La secuencia general de los horizontes de los perfiles es A1/A2, pero se ha comprobado que los Melanocryands están a mayor altura que los Fulvicryands (MIDENA, *et al.*, 2013y). En la **Figura 3.7** y el **Cuadro 3.2** se presenta y describe el perfil modal de los suelos clasificados como Fulvicryands.



Figura 3.7. Perfil del suelo clasificado como Typic Fulvicryands (izquierda) localizado en Loma Páramo Chico, Cangahua, Pichincha, sobre una vertiente abrupta de la Formación Cangahua (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013ac).

Cuadro 3.2. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Fulvicryands (MIDENA, *et al.*, 2013ac).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A1	0-25	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF; densidad aparente: 0.75 g cm ⁻³ ; pH: 5.8; materia orgánica: 11.8 %; CIC: 23 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 37 %.
A2	25-110+	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco limosa; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF.

Existen pequeñas áreas de suelos clasificados como Haplocryands (**Figura. 3.8** y **Cuadro 3.3**) que se caracterizan por tener abundante vidrio volcánico (obsidiana, piedra pómez y/o cascajo), por estar localizados muy cerca de los sitios de emisión del material magmático (cráter o edificio volcánico).



Figura 3.8. Perfil del suelo clasificado como Vitric Haplocryands (izquierda) localizado en Chocaví, San Isidro de Patalú, Chimborazo, sobre el cual se cultivan pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2012b).

Cuadro 3.3. Características del perfil de suelo clasificado como Vitric Haplocryands (MIDENA, *et al.*, 2012b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-29	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: granular a bloques subangulares, friable, con fragmentos de grava fina; mediana reacción al NaF; pH: 6.0; materia orgánica: 3.2 %; CIC: 6 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 81 %.
Bw1	29-80	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares y angulares, friable, con fragmentos de grava fina; mediana reacción al NaF; pH: 5.8; materia orgánica: 3.2 %.
Bw2	80-115	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques angulares, friable, con fragmentos de grava fina.
2Ab	115-135+	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares a angulares, firme; mediana reacción al NaF.

Los Hydrocryands y Melanocryands tienen horizontes profundos, sin embargo, los primeros predominan en las áreas donde la precipitación es alta y su capacidad de retención de agua es superior al 100 %, son suelos pobres en vidrio volcánico, presentan arcillas amorfas (alófana), son ricos en materia orgánica de restos vegetales no descompuestos, poseen pH ácido y bajas cantidades de P disponible (Custode, *et al.*, 1999).



Figura 3.9. Perfil del suelo clasificado como Typic Hydrocryands (izquierda) localizado en Mirador, Mariscal Sucre, Carchi, cubierto con pajonales de altura (*Stipa ichu*) y frailejones (*Espeletia pycnophylla*) (MIDENA, *et al.*, 2013n).

Cuadro 3.3. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Hydrocryands (MIDENA, *et al.*, 2013n).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0-40	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: grumosa, friable; pH: 3.6; materia orgánica: 9.6 %; CIC: 40 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 59 %.
A	40-60	Color: gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares, friable; ligera reacción al NaF; densidad aparente: 0.37 g cm ⁻³ ; pH: 4.70; materia orgánica: 12.5 %; CIC: 19 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 44 %.
AC	60-95	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: franca; estructura: masiva a bloques subangulares, friable; media reacción al NaF; pH: 5.1; materia orgánica: 1.5 %.
C	95-110	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, friable; fuerte reacción al NaF; pH: 4.9; materia orgánica: 0.8 %.

Los suelos de las Cimas Frías (páramos) tienen un alto potencial para secuestrar carbono (C), pero son particularmente importantes porque son el gran reservorio de agua para la población localizada en los valles interandinos (de Bievre, *et al.*, 2011). La conservación de estos suelos es una prioridad nacional.

3.2.2. Flancos de los Volcanes

Estos paisajes de la Sierra Norte, que están relacionados con la mayoría de los volcanes presentes en la zona, se definen alrededor de estas estructuras, tiene laderas de pendientes moderadas a fuertes en una transición gradual de paisajes hacia los paisajes andinos de zonas más bajas. Estos ambientes se ubican entre los 3 000 y 3 500 m s. n. m. y varían en altitud dependiendo del volcán alrededor del cual se sitúan, especialmente al sur de la Sierra Norte. Estas áreas tienen origen netamente volcánico debido a que las proyecciones se depositaron alrededor de los edificios volcánicos y por efecto de la pendiente se dispersaron alrededor del entorno. Gran parte de esta ceniza fue removida del sitio de asentamiento por las altas descargas hídricas que acompañaron a las erupciones volcánicas. Estos episodios de emisión y arrastre de material volcánico a través del tiempo no fueron uniformes e hicieron que se intercalen en el perfil capas alternas de diferente material (tobas, lahares, flujos, derrames de lavas, etc.) y de diferente tamaño (ceniza, lapilli, pómez) en sectores donde la acumulación piroclástica fue profunda, pero en otros sectores se acumuló poco material volcánico e incluso en ciertos sitios afloran las rocas (**Figura 3.10**) (Winckell, *et al.*, 1997b). Por todas estas razones, en esta unidad se observan interfluvios de cima plana a ligeramente ondulada de cientos de metros a varios kilómetros, separados por marcadas entalladuras conocidas como quebradas. Estas áreas tienen relieve colinado, vertientes de flujos de lava y mesetas volcánicas con perfiles heterogéneos en su mayoría con fondos coluviales. Estas zonas tienen temperaturas promedio anuales que varían entre los 11 y 16 °C, precipitaciones anuales en el rango de 500 a 1 000 mm y tiene un régimen isomésico de temperatura del suelo (MIDENA, *et al.*, 2013y).



Figura 3.10. Flancos de los volcanes Ilinizas (izquierda) y del volcán Cayambe (derecha) (fotografías de Renato Haro).

La vegetación de los Flancos es variada. Existen sectores cubiertos con vegetación primaria y vida silvestre que todavía no se han alterado. En estos sitios se encuentran los típicos pajonales de páramo, mientras que en otros existen bosques frondosos de matorrales, vegetación arbustiva y arbórea. Sin embargo, las partes bajas de los Flancos están ocupadas con pastizales utilizados en ganadería lechera o con cultivos de papa, haba o cebada (MIDENA, *et al.*, 2013y). El avance de la frontera agrícola ha sustituido la vegetación de páramo remanente con pastos y cultivos, transformación que ha afectado significativamente las áreas de conservación y amortiguamiento con los páramos fríos (de Bievre, *et al.*, 2011).

Los suelos de los Flancos de los Volcanes son Andisoles negros, inmaduros, con débil desarrollo de los horizontes, profundos a medianamente profundos y con alto contenido de materia orgánica. La mayoría de estos suelos están clasificados como Melanudands y Hapludands (Soil Survey Staff, 2006) (Figuras 3.11 y 3.12 y Cuadros 3.4 y 3.5) (MIDENA, *et al.*, 2015b).



Figura 3.11. Perfil del suelo clasificado como Pachic Melanudands (izquierda) localizado en el sitio Murco, Tambillo, Pichincha, sobre una vertiente donde se ha cultivado pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013ab).

Cuadro 3.4. Características del perfil de suelo clasificado como Pachic Melanudands (MIDENA, *et al.*, 2013ab).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-25	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares, friable, con fragmentos de grava fina; ligera reacción al NaF; densidad aparente: 1.04 g cm ⁻³ ; pH: 6.3; materia orgánica: 11.4 %; CIC: 26 cmol kg ⁻¹ y saturación de bases: 44 %.
A	25-90+	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenoso; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF; pH: 6.4; materia orgánica: 11.4 %.



Figura 3.12. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (izquierda) localizado en Vera Pamba, Tocachi, Pichincha, sobre el cual se han cultivado pastos, habas y cebada (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013ad).

Cuadro 3.5. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013ad).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-30	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares, friable; media reacción al NaF; densidad aparente: 1.07 g cm ⁻³ ; pH: 6; materia orgánica: 8.5 %; CIC: 21 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 37 %.
A	30-100	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, friable; media reacción al NaF; densidad aparente: 1.12 g cm ⁻³ ; pH: 5.5; materia orgánica: 5.9 %.

En los Flancos también aparecen, en menor cantidad, suelos clasificados como Mollisoles y Vitrandes (**Figura 3.13** y **3.14** y en los **Cuadro 3.6** y **3.7**), profundos a moderadamente profundos y con contenidos altos de materia orgánica (Soil Survey Staff, 2006).



Figura 3.13. Perfil del suelo clasificado como Typic Argiudolls (izquierda) localizado en San Juan, Tumbaco, Pichincha, sobre el cual se siembran pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013z).

Cuadro 3.6. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Argiudolls (MIDENA, *et al.*, 2013z).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-20	Color primario: pardo grisáceo (10YR 5/2) en húmedo; color secundario: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares, friable; densidad aparente: 1.25 g cm ⁻³ ; pH: 7.3; materia orgánica: 2.8 %; CIC: 14 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 88 %.
AB	20-45	Color primario: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; color secundario: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares, firme; pH: 6.4; materia orgánica: 3.3 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 97 %.
Bt	45-85	Color primario: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; color secundario: negro (10 YR 2/1) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: bloques angulares, firme; pH: 6.5; materia orgánica: 3.1 %.
C	85-110+	Color primario: gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; color secundario: negro (10YR 2/1) en húmedo con muchos moteados pardo amarillento (10 YR 5/8); textura: franco arenosa; estructura: masiva, firme.

**Figura 3.14.** Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (izquierda) localizado en hacienda Cathziqui de Herrera, Nono, Pichincha, sobre el cual se cultiva pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013ag).

Cuadro 3.7. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013ag).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-33	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: granular a bloques subangulares, friable, con fragmentos de grava fina; ligera reacción al NaF; densidad aparente: 1.22 g cm ⁻³ ; pH: 5.1; materia orgánica: 1.9 %; CIC: 6 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 48 %.
C1	33-60	Color: pardo oliva (2.5Y 4/4) en húmedo; textura: arena gruesa; estructura: grano simple, suelto, con fragmentos de grava fina; ligera reacción al NaF.
C2	60-80	Color: pardo oliva (2.5Y 4/3) en húmedo; textura: arena media; estructura: grano simple, suelto; mediana reacción al NaF.
2C3	80-95+	Color primario: amarillo pálido (2.5Y 8/2) en húmedo; color secundario: amarillo oliva (2.5Y 6/6) en húmedo; textura: arena; estructura: grano simple, suelto, con fragmentos de grava fina; mediana reacción al NaF.

3.2.3. Vertientes Externas

Estos paisajes están ubicados a los lados exteriores, occidental y oriental, del gran macizo de los Andes. El lado occidental se caracteriza por cambios bruscos de pendiente a medida que desciende hacia la región Costa, pero en el lado oriental el cambio de pendiente es más gradual en su descenso hacia la Amazonía gracias a la transición que ofrecen los relieves subandinos del domo del Napo. Las vertientes occidentales se originaron de la acumulación de material volcánico producto de erupciones y del arrastre de una variedad de sedimentos promovidos por la intensa tectónica que soportó el sector, mientras que las vertientes orientales se desarrollaron sobre formaciones metamórficas con la presencia de un manto de proyecciones piroclásticas de diverso espesor, modeladas únicamente por la erosión (Winckell, *et al.*, 1997a). En estas áreas se encuentran relieves montañosos, relieves colinados de diversa gradación, vertientes abruptas, abruptos, conos de deyección, coluviones y superficies onduladas ubicadas en sectores de menor pendiente y que siempre están demarcando coluvios aluviales y barrancos profundos. Estas vertientes forman verdaderas murallas delineadas por estrechos y profundos barrancos por donde circulan las aguas del amplio sistema hidrográfico de la región.

Las dos Vertientes Externas se localizan en sectores con climas entre subhúmedo y muy húmedo subtropical, con temperaturas promedio entre los 18 y 24 °C que, además, tienen una constante cobertura nubosa y neblina (Cañadas, 1983). Las vertientes occidentales presentan pluviosidades anuales que varían entre 1 500 y 3 000 mm, pero en las vertientes orientales la pluviosidad llega hasta 5 000 mm. La temperatura y las abundantes lluvias en ambas vertientes han promovido el desarrollo de un régimen isohipertérmico de temperatura del suelo y de un régimen de humedad údico y hasta perúdico en algunos sectores (Winckell, *et al.*, 1997b).

La cobertura de las Vertientes Externas está constituida por una vegetación arbórea densa que abarca las dos grandes áreas de bosques ombrófilos del país (vertientes noroeste y oriente), con gran diversidad florística y estaciones secas muy cortas o inexistentes. Hacia las zonas más altas emergen estratos de árboles grandes que luego pasan a arbustos y finalmente, en los sitios más altos, la cobertura es herbácea (Huttel, *et al.*, 1999).

Los principales suelos de estos paisajes son Andisoles, especialmente en las vertientes occidentales, donde las cenizas de las erupciones del Cuaternario se distribuyeron ampliamente arrastradas por los vientos alisios. Estos suelos tienen color pardo oscuro y son desaturados, vítreos, generalmente discontinuos en su distribución vertical (MIDENA, *et al.*, 2013x). Un suelo representativo de esta zona, clasificado como Thaptic Hapludands (Soil Survey Staff, 2006), se presenta en la **Figura 3.15** y se describe en el **Cuadro 3.8**.



Figura 3.15. Perfil del suelo clasificado como Thaptic Hapludands (izquierda, localizado en los bajos del cerro Bombolí, Aloag, Pichincha, sobre relieves volcánicos donde se cultivan pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013aa).

Cuadro 3.8. Características del perfil de suelo clasificado como Thaptic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013aa).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A1	0-25	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franca; estructura: granular, friable; ligera reacción al NaF; densidad aparente: 1.06 g cm ⁻³ ; pH: 6.5; materia orgánica: 9.2 %; CIC: 17 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 40 %.
A2	25-35	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franca; estructura: masiva a bloques subangulares, friable; ligera reacción al NaF.
C	35-45	Color: oliva pardo (5Y 6/3) en húmedo; textura: arenosa; estructura: masiva, porosa, friable; media reacción al NaF.
2Ab	45-70+	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva a bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF.

En estas zonas aparecen también suelos clasificados como Inceptisoles en áreas de alta pluviosidad, alta temperatura y fuertes pendientes que promueven el lavado continuo de las bases de intercambio y con señales de continua meteorización del material parental evidentes en la oxidación en el perfil (colores amarillos a rojos) (MIDENA, *et al.*, 2015a). Un suelo representativo de estas zonas, clasificado como Humic Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2006), se presenta en la **Figura 3.16** y en el **Cuadro 3.9**.



Figura 3.16. Perfil del suelo clasificado como Andic Dystrudepts (izquierda) localizado en Chalguayacu, García Moreno, Imbabura, sobre relieves colinados muy altos dedicados al cultivo de pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2014b).

Cuadro 3.9. Características del perfil de suelo clasificado como Andic Dystrudepts (MIDENA, *et al.*, 2014b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; textura: franco arcillo arenosa; estructura: granular a bloques subangulares, friable; ligera reacción al NaF; densidad aparente: 1.25 g cm ⁻³ ; pH: 6.2; materia orgánica: 3.9 %; CIC: 17 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 38 %.
Bw	20-50	Color: pardo oliva (2.5Y 4/3) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, friable; pH: 6.1; materia orgánica: 0.9 %; CIC: 11 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 25 %.
C	50-110+	Color primario: blanco (2.5Y 8/1) en húmedo; color secundario: pardo fuerte (7.5 YR 4/6) en húmedo; textura: arena gruesa; estructura: masiva, desmenuzable.

Las características ándicas de los suelos de estos paisajes se hacen gradualmente menos pronunciadas a medida que se ubican más al sur en la Sierra hasta que desaparecen, situación que se puede observar en los perfiles de Andisoles hacia el Norte (**Figura 3.17** y **Cuadro 3.10**) y los perfiles de Dystrudepts hacia el Sur (**Figura 3.18** y **Cuadro 3.11**).



Figura 3.17. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (izquierda) localizado en Río Macas, San Miguel de los Bancos, Pichincha, sobre una vertiente de cono de deyección antiguo (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013ae).

Cuadro 3.10. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013ae).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-10	Color: gris muy oscuro (7.5YR 3/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF; densidad aparente: 0.98 g cm ⁻³ ; pH: 5.7; materia orgánica: 5.4 %; CIC: 12 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 34 %.
BC	10-70	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, firme; fuerte reacción al NaF; pH: 5.8; materia orgánica: 2.6 %; CIC: 11 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 18 %.
C	70-110	Color: pardo (10YR 4/3) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, firme; media reacción al NaF.



Figura 3.18. Perfil del suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (izquierda) localizado en Estero Las Pavas, El Piedrero, límite entre Cañar y Guayas, sobre un relieve colinado que se cultiva con pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013l).

Cuadro 3.11. Características del perfil de suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (MIDENA, *et al.*, 2013l).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-25	Color: pardo oscuro (7.5YR 3/4) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares, friable; pH: 5.6; materia orgánica: 3.3 %; CIC: 16 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 56 %.
Bw	25-50	Color primario: rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo; color secundario: rojo (2.5YR 5/8) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: masiva a bloques subangulares, friable, con fragmentos de grava gruesa; pH: 5.8; materia orgánica: 1.0 %; CIC: 18 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 59 %.
C	50-100+	Color: rojo (2.5YR 4/8) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: masiva, friable, con fragmentos de grava gruesa; pH: 5.8; materia orgánica: 0.4 %; CIC: 22 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 40 %.

3.2.4. Vertientes Internas

Este gran paisaje se divide en dos zonas: a) Vertientes Superiores ubicadas a altitudes mayores a 3 000 m s. n. m. limitando con las tierras frías de la cordillera; y b) Vertientes Inferiores, ubicadas sobre los 2 500 - 2 600 m s. n. m. (Winckell, *et al.*, 1997a).

Las Vertientes Superiores presentan extensiones cimaras onduladas, moldeadas por las coberturas glaciares y cubiertas por vegetación de páramo. Son zonas de frecuente cobertura nubosa, debido a que las grandes masas de aire provenientes del occidente y oriente han perdido gran parte de su humedad por precipitaciones descargadas en las vertientes externas y cimas frías (Winckell, *et al.*, 1997a).

Los suelos dominantes en esta zona son Andisoles de color negro, muy untuosos, en ocasiones con presencia de una capa subsuperficial arcillosa negra, denominada localmente chocoto (MIDENA, *et al.*, 2013j). Un suelo representativo de esta zona, clasificado como Typic Hapludands (Soil Survey Staff, 2006), se presenta en la **Figura 3.19** y en el **Cuadro 3.12**.



Figura 3.19. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (izquierda) localizado en San José, Huaca, Carchi, sobre un relieve volcánico colinado utilizado para la siembra de pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013o).

Cuadro 3.12. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013o).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, muy friable; fuerte reacción al NaF; densidad aparente: 0.69 g cm ⁻³ ; pH: 5.2; materia orgánica: 0.7 %; CIC: 15 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 75 %.
A1	20-53	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, firme; fuerte reacción al NaF; pH: 5.9; materia orgánica: 4.4 %; CIC: 19 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 71 %.
A2	53-96	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF; pH: 5.1; materia orgánica: 1.5 %.
C	96-130	Color: pardo amarillento (10YR 5/6) en húmedo; estructura: masiva, desmenuzable.

Por otra parte, las vertientes inferiores presentan pendientes muy suaves que son una transición gradual hacia los modelados de los paisajes inferiores de las cuencas interandinas. El clima es diferente a medida que cambia la altitud, pasando de húmedo a seco al descender de las zonas altas a las zonas bajas, conformando el sistema de microclimas característico del interior de las cordilleras que controla la cobertura vegetal. Esta situación ocurre porque las corrientes de aire húmedo provenientes de las llanuras deben remontar el obstáculo topográfico que ofrece la gran cordillera y en el camino descargan gran parte de su humedad en las vertientes externas y en las cimas frías de la cordillera para luego descender por el interior de la zona interandina como aire muy seco que va aumentando de temperatura a medida que alcanza el fondo de los valles (Cañadas, 1983). Esto ha hecho que el régimen de temperatura del suelo de las vertientes inferiores sea isotérmico. Por estas razones, en estas zonas predominan suelos clasificados como Mollisoles caracterizados por tener un epipedón de color oscuro, rico en bases de cambio y materia orgánica, condiciones favorables para el desarrollo radicular (MIDENA, *et al.*, 2012c). En algunas áreas se presentan, a diferente profundidad, capas endurecidas alternas denominadas cangahua formadas principalmente por la sedimentación de tobas volcánicas constituidas por ceniza consolidada y depósitos de ceniza no consolidada. Estas capas endurecidas, que limitan el desarrollo radicular, no califican como duripanes o fragipanes porque no se han consolidado por cementación con sílice iluvial sino por una mezcla de arcillas silicatadas y silicatos amorfos, por esta razón, se clasifican como protoduripanes, es decir, duripanes incipientes (Creutzberg, *et al.*, 1990; Zebrowski, *et al.*, 1997). Estos suelos se siembran una diversidad de cultivos con el apoyo de riego. Un suelo representativo de estas zonas, clasificado como Entic Durustolls (Soil Survey Staff, 2006), se presenta en la **Figura 3.20** y en el **Cuadro 3.13**.

Estos suelos, generalmente profundos, han sufrido un proceso acelerado de erosión que ha dejado en muchos sitios capas delgadas de suelo sobre la cangahua endurecida dejando poco espacio para el desarrollo radicular. En muchas áreas la cangahua se ha expuesto completamente.



Figura 3.20. Perfil del suelo clasificado como Typic Durustolls (izquierda) localizado en Payama, García Moreno, Carchi, sobre un relieve volcánico colinado (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2014a).

Cuadro 3.13. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Durustolls (MIDENA, *et al.*, 2014a).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; textura: franca; estructura: granular, muy friable; pH: 6.7; materia orgánica: 2.2 %; CIC: 19 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 65 %.
Bt	20-35	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: prismática subangular, firme; pH: 7.1; materia orgánica: 1.9 %; CIC: 17 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 62 %.
2Cqm	35-55+	Color: amarillo (10YR 7/6) en seco y pardo amarillento (10 YR 4/4) en húmedo; textura: franco limosa (cangahua); estructura: masiva, firme, capa cementada.

3.2.5. Fondos de Cuencas y Callejón Interandino

Las dos grandes cadenas volcánicas de la zona norte de los Andes Ecuatorianos forman en su interior un extenso callejón de alrededor de 350 km desde la frontera con Colombia hasta las cercanías del poblado de Alausí al Sur. Internamente, en sentido este-oeste, se presentan varios estratovolcanes, denominados nudos, que dividen este gran callejón en valles y cuencas pequeñas. Toda esta unidad está cubierta por suelos derivados de cenizas volcánicas (Winckell, *et al.*, 1997a).

Los Fondos de Cuenca y Valles Interandinos, que se ubican a altitudes entre los 2 000 y 3 000 m s. n. m., tienen una temperatura media anual que varía entre los 13 y 18 °C y una pluviosidad anual entre 200 y 500 mm que entregan su mayor descarga antes y después de los equinoccios y con una marcada estación seca en los meses de julio, agosto y septiembre. En algunos sectores el clima es árido (Cañadas, 1983). Estas condiciones han promovido el desarrollo de un régimen isotérmico de temperatura y un régimen ústico de humedad en el suelo (MIDENA, *et al.*, 2013y).

La cobertura vegetal del callejón interandino es variada y se distribuye en sistemas de producción por pisos altitudinales. Los sistemas de producción centrados en el cultivo de papa y pastos para la producción lechera se ubican en las partes más altas, mientras que hacia las zonas más bajas y calientes los sistemas giran alrededor de la producción de maíz y fréjol, pero en sectores con posibilidad de riego se cultivan hortalizas y frutales (Huttel, *et al.*, 1999). En las últimas décadas ha crecido significativamente la siembra de flores de corte bajo invernadero (especialmente la rosa) y a campo abierto como cultivos de alta rentabilidad para estas

zonas (PROECUADOR, 2019). En el año 2018, la superficie cosechada de flores a nivel nacional fue de 6 960 ha, donde la rosa es la especie predominante con un 73.9 % de la superficie cosechada (INEC, 2018).

Los suelos característicos de estas zonas están clasificados como Mollisoles, pero tienen cangahua a poca profundidad. Como suelo representativo de estas zonas se presenta el suelo clasificado como Entic Durustolls (Soil Survey Staff, 2006) en la **Figura 3.21** y en el **Cuadro 3.14**.

En las zonas más secas se presentan suelos clasificados como Entisoles caracterizados por tener poca o ninguna evidencia de desarrollo de horizontes pedogenéticos (MIDENA, *et al.*, 2013y). Como representativo de estas zonas se presenta en la **Figura 3.22** y en el **Cuadro 3.15** el suelo clasificado como Typic Ustipsamments (Soil Survey Staff, 2006).



Figura 3.21. Perfil del suelo clasificado como Entic Durustolls (izquierda) localizado en Comuna Iguñaro, Quinche, Pichincha, sobre un relieve volcánico colinado (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013ah).

Cuadro 3.14. Características del perfil de suelo clasificado como Entic Durustolls (MIDENA, *et al.*, 2013ah).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares, friable; ligera reacción al NaF; densidad aparente: 1.48 g cm ⁻³ ; pH: 6.1; materia orgánica: 4.4 %; CIC: 22 cmol kg ⁻¹ y saturación de bases: 87 %.
A	20-35	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares, friable; ligera reacción al NaF.
Cqm	35-56+	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arcillosa (cangahua); estructura: masiva, firme; ligera reacción al NaF.

En las zonas secas existen suelos poco evolucionados que se caracterizan por ser sueltos, sin estructura, ricos en piedra pómez milimétrica y bajo contenido de materia orgánica. Estos suelos se clasifican como Psamments (**Figura 3.22** y **Cuadro 3.15**) o Vitrandes (**Figura 3.23** y **Cuadro 3.16**) y se diferencian porque el contenido de materia orgánica de los Vitrandes es > 1 %. Es común encontrarlos en la zona de Calderón al norte de Quito y la zona de Palmira en la provincia de Chimborazo, sitios donde se puede observar la formación de dunas talladas por el viento (Custode, *et al.*, 1999).



Figura 3.22. Perfil del suelo clasificado como Typic Ustipsamments (izquierda) localizado en Pacpo, Calderón, Pichincha, sobre una llanura de depósitos volcánicos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013af).

Cuadro 3.15. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Ustipsamments (MIDENA, *et al.*, 2013af).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (2.5Y 4/2); color en seco: gris parduzco claro (2.5Y 6/2); textura: franco arenosa; estructura: granular, muy friable, con fragmentos de grava fina; media reacción al NaF; densidad aparente: 1.22 g cm ⁻³ ; pH: 7.2; materia orgánica: 0.6 %; CIC: 5 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 79.40 %.
A	20-35	Color: pardo oliva oscuro (2.5Y 3/3) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, grano simple, muy friable, con fragmentos de grava fina; media reacción al NaF; pH: 7.6; materia orgánica: 0.3 %.
C1	35-55	Color: pardo oliva (2.5Y 4/3) en húmedo; textura: arenosa; estructura: masiva, grano simple, suelto, con fragmentos de grava fina; media reacción al NaF.
2C2	55-80	Color: gris oliva claro (5Y 6/2) en húmedo; textura: areno francosa; estructura: masiva, muy friable, con fragmentos de grava fina; media reacción al NaF.
2C3	80-105	Color: gris parduzco claro (2.5Y 6/2) en húmedo; textura: areno francosa; estructura: masiva, porosa, friable; media reacción al NaF.



Figura 3.23. Perfil del suelo clasificado como Typic Ustivitrands (izquierda) localizado en Pungal, La Providencia, Chimborazo, sobre una terraza media (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2012a).

Cuadro 3.16. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Ustivitrands (MIDENA, *et al.*, 2012a).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-30	Color: gris oscuro (10YR 4/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, grano simple, friable, con fragmentos de grava fina; ligera reacción al NaF; pH: 7.1; materia orgánica: 1.7 %.
C1	30-52	Color: gris oscuro (10YR 4/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, grano simple, friable, con fragmentos de grava fina; media reacción al NaF; pH: 7.3; materia orgánica: 0.3 %.
2C2	52-64	Color: gris (10YR 6/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, desmenuzable, friable; media reacción al NaF.
3C3	64-84	Color: gris (10YR 5/1) en húmedo; textura: areno francosa; estructura: masiva, grano simple, friable, con fragmentos de grava fina; media reacción al NaF.
3C4	84-115+	Color: gris (10YR 5/1) en húmedo; textura: areno francosa; estructura: masiva, grano simple, friable, con fragmentos de grava fina; media reacción al NaF.

3.2.6. Medio Aluvial

Estos son paisajes influenciados directamente por la acción de los ríos. Son sistemas muy variables que cambian con el tiempo debido a los procesos erosivos y a la sedimentación, procesos que responden también a cambios climáticos, modificaciones de nivel de base, tectónica cuaternaria y a la continua actividad humana. Es decir, estos paisajes son el resultado del continuo desarrollo de la red fluvial andina en sus diferentes etapas de socavamiento y deposición de materiales en los cauces. La gran mayoría se ubica en las partes bajas del callejón andino, en climas secos (Winckell, *et al.*, 1997b).

La utilización agrícola de las zonas más secas o semiáridas del Medio Aluvial de la Sierra Norte es limitada y solamente sobreviven especies arbustivas espinosas (penco y cactus). En sitios donde existe acceso a riego se cultivan huertos de hortalizas y frutales. En algunos sitios existen bosques de eucalipto (Mejía, 1997; Huttel, *et al.*, 1999).

Los suelos de estas zonas de ambientes secos, que presentan pH alcalino y una elevada carga de bases, están clasificados mayormente como Entisoles. Un ejemplo es el suelo clasificado como Mollic Ustifluvents (Soil Survey Staff, 2006) que se presenta en la **Figura 3.24** y en el **Cuadro 3.17**. Existen suelos que presentan fragmentos de roca dentro del perfil (**Figura 3.25** y **Cuadro 3.18**.) producto del arrastre de materiales.

Es necesario diferenciar la presencia de fragmentos gruesos dentro del perfil de suelos formados por acción fluvial (**Figura 3.25**), de suelos formados por la acumulación de materiales coluvionados (**Figura 3.26** y **Cuadro 3.19**).



Figura 3.24. Perfil del suelo clasificado como Mollic Ustifluvents (izquierda) localizado en Caldera, San Rafael, Carchi, en una terraza media sobre la cual se siembra fréjol, cítricos y pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2014c).

Cuadro 3.17. Características del perfil de suelo clasificado como Mollic Ustifluents (MIDENA, *et al.*, 2014c).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-37	Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; color en seco: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franca; estructura: granular a bloques subangulares, muy friable, con fragmentos de grava media; pH: 7.4; materia orgánica: 1.3 %; CIC: 19 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 79 %.
2Ab	37-65	Color: pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares, muy friable; pH: 7.5; materia orgánica: 1.5 %; CIC: 21 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 71 %.
2C	65-100+	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, con moteados de color moteado principal pardo fuerte (7.5YR 4/6); textura: franco arenosa; estructura: masiva, muy friable.

**Figura 3.25.** Perfil del suelo clasificado como Aridic Ustifluents (izquierda) localizado en Apaqui, Los Andes, Carchi, en una terraza alta sobre la cual se siembra caña de azúcar y pimienta (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2014d).**Cuadro 3.18.** Características del perfil de suelo clasificado como Aridic Ustifluents (MIDENA, *et al.*, 2014d).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-25	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); color en seco: pardo pálido (10YR 6/3); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, suelto; pH: 7.6; materia orgánica: 0.1 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 94 %.
C	25-40	Color: pardo grisáceo (10YR 5/2) en húmedo; textura: areno francosa; estructura: masiva, desmenuzable, con fragmentos de grava gruesa.
Cr	40-80	Color: pardo (10YR 4/3) en húmedo; textura: areno francosa; estructura: masiva, grano simple, firme, con fragmentos de grava gruesa.



Figura 3.26. Perfil del suelo clasificado como Udorthentic Haplustolls (izquierda) localizado en La Gruta, Cotacachi, Imbabura, sobre un coluvión antiguo donde se siembran pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2014f).

Cuadro 3.19. Características del perfil de suelo clasificado como Udorthentic Haplustolls (MIDENA, *et al.*, 2014f).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-15	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: granular, friable, con fragmentos de grava fina; pH: 6.7; materia orgánica: 1.8 %; CIC: 10 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 83 %.
A	15-30	Color pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; textura franco arenosa; estructura de bloques subangulares; friable; con fragmentos de grava fina.
C1	30-50	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, friable, con fragmentos de grava media; pH: 6.8; materia orgánica: 1.1 %; CIC: 12 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 74 %.
C2	50-72	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, friable, con fragmentos de grava fina; ligera reacción al NaF.
2C3	72-93	Color: pardo amarillento muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, friable, con fragmentos de grava media; ligera reacción al NaF.
3C4	93-105	Color: gris muy oscuro (2.5Y 3/1) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: masiva, friable, con fragmentos de cantos rodados; fuerte reacción al NaF.

3.3. Suelos de los Andes Centrales

Los Andes Centrales de Ecuador parten desde Palmira-Alausí y llegan hasta Zaruma-Saraguro en el sur (**Figura 3.27**). Esta unidad presenta características originales: la zona, de paisajes de apreciables extensiones, no tiene edificios volcánicos recientes, el relieve es monótono y se parece al altiplano y a pesar de ser una zona muy marcada por la huella glaciaria el relieve es heredado de un basamento diferente constituido por amplios derramamientos volcánicos antiguos. Los Andes en esta zona son más anchos alcanzando 40 km al oeste de Cuenca, mientras que la altitud baja progresivamente hacia el sur, donde el punto más alto solo alcanza 3 800 m s. n. m. al oeste de Zaruma. Los valles, de regular amplitud, aparecen en forma escalonada entre los 1 600 m s. n. m. en Santa Isabel y

2 500 m s. n. m. en Saraguro. Estos valles se abren hacia la Costa por grandes incisiones recortadas en la vertiente occidental por donde evacúan los ríos Huigra, Cañar y Jubones. Estas hendiduras facilitan la circulación atmosférica en la región (Winckell, *et al.*, 1997b).

En la Sierra Centro no hay volcanes ni recubrimientos piroclásticos recientes. Las cordilleras se asientan sobre basamentos antiguos (volcánicos y metamórficos) y la zona interandina está fragmentada en dos conjuntos de valles y cuencas sedimentarios distribuidos en forma paralela (**Figura 3.28**). La zona presenta una cobertura pedológica distribuida en una topo-climo-secuencia: en las partes altas los suelos son ferralíticos-fersialíticos a menudo humíferos, en la zona media los suelos son moderadamente evolucionados con características móllicas o vérticas y en las zonas bajas los suelos son poco evolucionados (Winckell, *et al.*, 1997b). Por lo anterior, en esta región se han identificado tres paisajes o geosistemas con diferentes tipos de suelos: a) Vertientes Superiores de las Cuencas Interandinas, b) Vertientes Inferiores y c) Relieves de Fondo de las Cuencas.

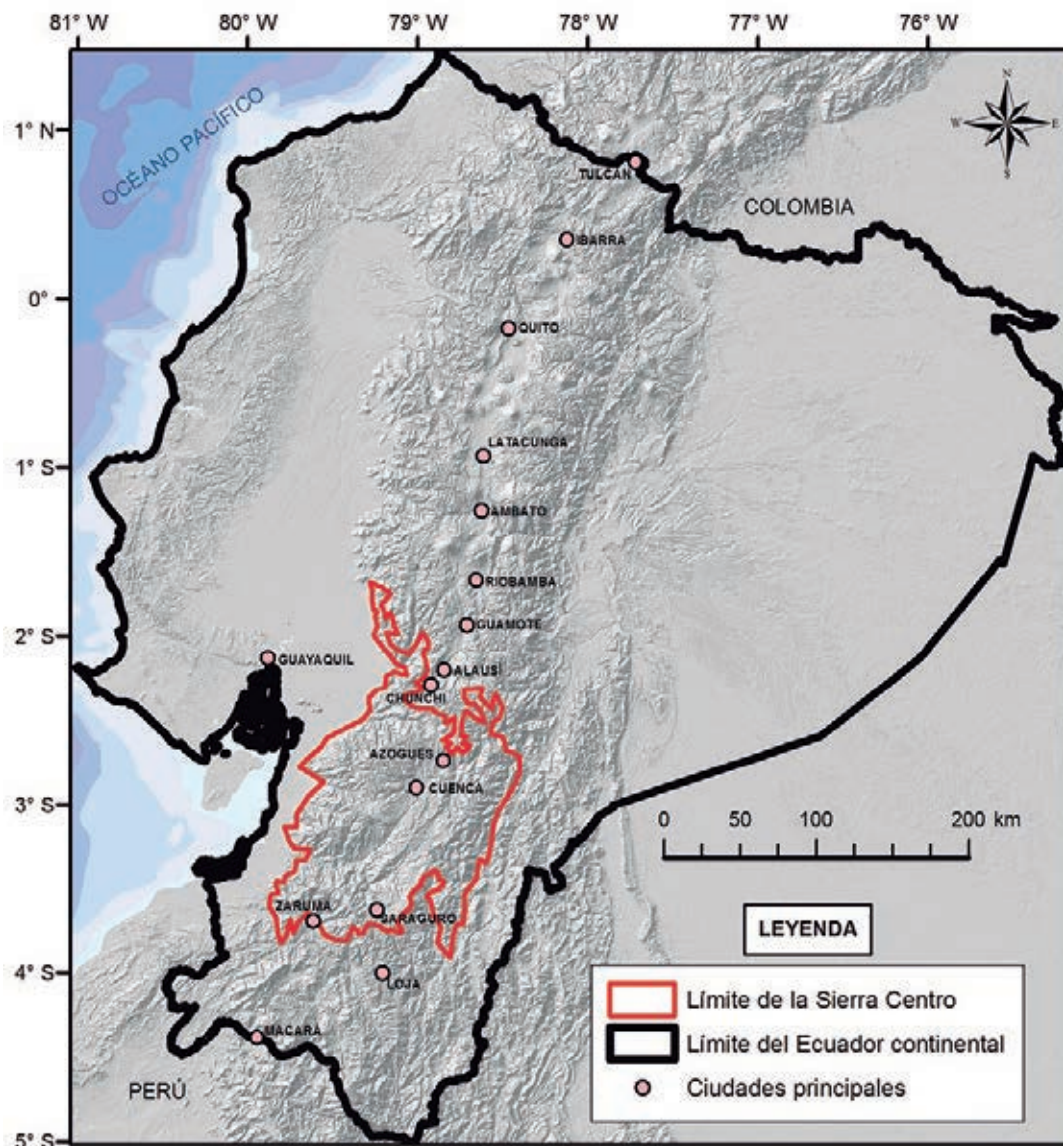


Figura 3.27. Ubicación de la Sierra Centro con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell, *et al.* (1997b).

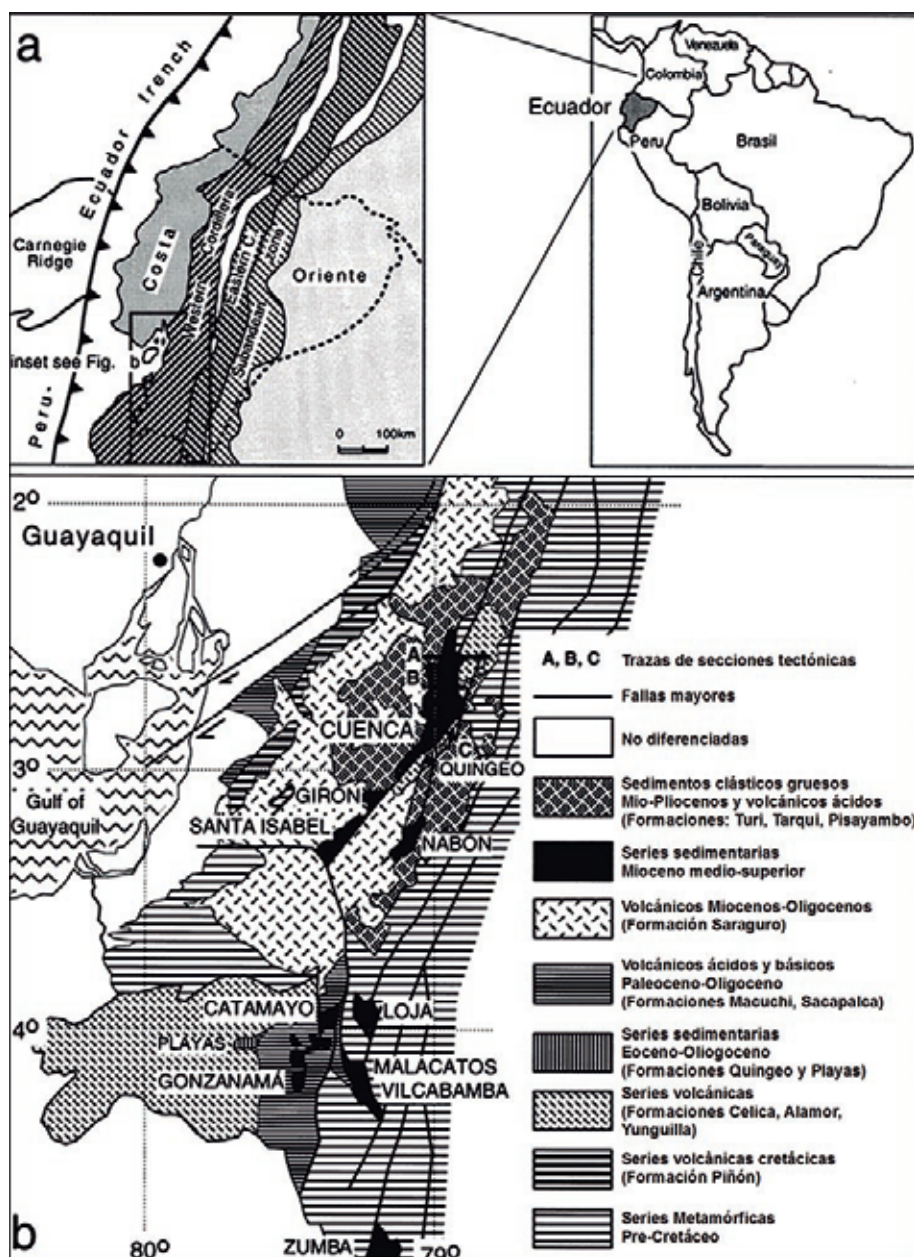


Figura 3.28. (a) Subdivisión morfotectónica del Ecuador; (b) Mapa geológico de la Sierra Centro y Sur con la ubicación de las principales cuencas sedimentarias (Steinmann, *et al.*, 1999).

3.3.1. Vertientes y Relieves Superiores

Estos paisajes se localizan principalmente en las partes superiores de las grandes entalladuras de los ríos León, Jubones y Paute. Se trata de grandes vertientes empinadas, con pendientes $> 50\%$. La precipitación media anual varía de 600 a 1 280 mm, con periodos secos de hasta seis meses. La altitud del límite inferior varía entre 1 600 a 2 800 m s. n. m., mientras que la cima alcanza altitudes de 3 200 m. s. n. m. Al occidente, los abruptos y escarpes rectilíneos están asentados sobre estratos más

coherentes (lavas, aglomerados e ignimbritas consolidadas) de formaciones volcánicas antiguas, mientras que al este los paisajes metamórficos se caracterizan por presentar una densa y fuerte disección en crestas agudas separadas por incisiones con faldas rectilíneas. En las zonas más húmedas, localizadas a mayor altitud, los suelos tienen alto contenido de materia orgánica y baja saturación de bases (**Figura 3.29** y **Cuadro 3.20**), mientras que en las zonas menos húmedas y de menor altitud (2 200 a 2 800 m s. n. m.) los suelos son fersialíticos, medianamente profundos y desaturados (**Figura 3.30** y **Cuadro 3.21**) (Winckell, *et al.*, 1997b).

Esta zona está ocupada por grandes superficies de praderas en pequeñas propiedades y grandes explotaciones extensivas hasta el límite con los páramos. Además, existen minifundios donde se cultiva cebada, haba, papa y maíz para choclo en las zonas altas y maíz y el fréjol en las zonas bajas (Winckell, *et al.*, 1997b).



Figura 3.29. Perfil del suelo clasificado como Ultic Hapludalfs (izquierda) localizado en Buena Vista, Ludo, Azuay, sobre un relieve volcánico colinado (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013w).

Cuadro 3.20. Características del perfil de suelo clasificado como Ultic Hapludalfs (MIDENA, *et al.*, 2013w).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-20	Color: gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, firme; pH: 5.9; materia orgánica: 5.5 %; CIC: 12 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 27 %.
AB	20-30	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques angulares, firme; pH: 6.3; materia orgánica: 4.3 %; CIC: 10 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 31 %.
Bt	30-80	Color primario: negro (10YR 2/1) en húmedo; color secundario: pardo pálido (10 YR 6/3); textura: franco arcillosa; estructura: bloques angulares, firme; pH: 6.3; materia orgánica: 2.7 %.
C	80-100+	Color: pardo amarillento claro (2.5Y 6/3) en húmedo; textura: areno francosa; estructura: masiva, friable.



Figura 3.30. Perfil del suelo clasificado como Typic Dystrudepts (izquierda) ubicado en La Esmeralda, San José de Raranga, Azuay, sobre un relieve volcánico colinado en una pendiente del 25 a 40 % (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013v).

Cuadro 3.21. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Dystrudepts (MIDENA, *et al.*, 2013v).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-25	Color: gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; textura: franco arcillo arenosa; estructura: bloques subangulares y angulares, friable; pH: 5.6; materia orgánica: 5.3 %; CIC: 14 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 56 %.
A	25-40	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arcillo arenosa; estructura: bloques angulares, friable; pH: 5.4; materia orgánica: 3.4 %; CIC: 10 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 35 %.
Bw	40-60	Color primario: rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo; color secundario: pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares, firme.
C	60-95	Color: rojo amarillento (5YR 5/8) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: masiva, firme.

En estos paisajes también se pueden observar superficies con cobertura parcial de materiales piroclásticos como los presentes en el cantón Sigsig, Azuay (**Figura 3.31** y **Cuadro 3.22**) (MIDENA, *et al.*, 2013i).



Figura 3.31. Perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (izquierda) ubicado en Pin Juma, Gima, Sigsig, Azuay sobre un relieve colinado alto en una pendiente > 70 % (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013u).

Cuadro 3.22. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013u).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, friable; ligera reacción al NaF; pH: 4.6; materia orgánica: 11.4 %; CIC: 22 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 22 %.
A	20-45	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF; pH: 5.0; materia orgánica: 6.9 %; CIC: 16 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 28 %.
Bw	45-70	Color: pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares a masiva, friable; fuerte reacción al NaF.
C	70-100+	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: masiva, firme; fuerte reacción al NaF.

3.3.2. Vertientes Inferiores

Estos paisajes son una continuidad topográfica de las Vertientes Superiores. Se ubican en la parte baja de las vertientes internas andinas y se desplazan hasta entrar en contacto con los pisos de las cuencas. Estas estribaciones presentan relieves más suaves que las vertientes superiores. El clima de esta zona es más seco, con precipitaciones que generalmente varían de 475 a 750 mm con periodos secos de hasta 10 meses. Un ejemplo de estos paisajes son las vertientes ubicadas en las parte inferior de las cuencas de Oña (entre 1 800 y 2 300 m s. n. m.) y Saraguro (entre 2 400 y 2 800 m s. n. m.), así como las entalladuras de la cuenca del Paute. Los cultivos principales son maíz, maíz asociado con el fréjol y trigo en las partes más altas (Winckell, *et al.*, 1997b).

Los suelos en estas áreas son vertisoles muy arcillosos cuando el material parental proviene de rocas metamórficas (**Figura 3.32** y **Cuadro 3.23**) y vertisoles arcillo-pedregosos cuando el material es sedimentario (**Figura 3.33** y **Cuadro 3.24**) (MIDENA, *et al.*, 2013i).



Figura 3.32. Perfil del suelo clasificado como Chromic Haplusterts (izquierda) ubicado en Daniel Córdova Toral, Gualaceo, Azuay, sobre una vertiente heterogénea con fuerte disección en pendientes de 25 a 40 % (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015).

Cuadro 3.23. Características del perfil de suelo clasificado como Chromic Haplusterts (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-35	Color: pardo (10YR 4/2) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: granular, firme; pH: 6.3; materia orgánica: 3.3 %; CIC: 9.3 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 141 %.
Bss	35-85	Color: gris (10YR 3/1) en húmedo con moteados pardos (5YR 3/4); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares y angulares, muy firme; pH: 6.3; materia orgánica: 1.5 %; CIC: 7.3 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 157 %.
Cr	85-95	Roca fragmentada.



Figura 3.33. Perfil de suelo clasificado, como Typic Argiudolls (izquierda) ubicado en Charunes, San Bartolomé, Azuay, en pendientes < 40 % (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013p).

Cuadro 3.24. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Argiudolls (MIDENA, *et al.*, 2013p).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-15	Color: gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: bloques angulares y subangulares, firme, con fragmentos de grava fina; ligera reacción al NaF; pH: 6.9; materia orgánica: 1.3 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 98 %.
A	15-35	Color: gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: bloques angulares, firme; ligera reacción al NaF; pH: 7.0; materia orgánica: 1.0 %; CIC: 35 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 97 %.
Bt	35-57	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: bloques angulares, firme, con fragmentos de grava fina; ligera reacción al NaF.
C	57-80+	Color: rojo débil (10R 5/2) en húmedo; textura: arcilla pesada; estructura: masiva, firme; sin reacción al NaF.

3.3.3. Fondos de las Cuencas

Los paisajes de esta zona están localizados a menor altitud y son menos accidentados. Por su situación geográfica son más abrigados y secos que los relieves circundantes, sin embargo, en la franja entre 1 000 y 3 000 m s. n. m. existen variaciones de humedad que van desde muy secas hasta húmedas. Las zonas más húmedas se encuentran en el valle de Cuenca con 835 mm de precipitación media anual y dos meses secos, mientras que los valles que desembocan en la región costanera, como la cuenca de Cañar, son más secos con solamente 500 mm de precipitación media anual y con ocho meses sin lluvia. Los pisos de las cuencas tienen, en general, pendientes suaves con bajo desnivel relativo. Un ejemplo de los suelos de esta zona se presenta en la **Figura 3.34** y en el **Cuadro 3.25**. Este suelo, clasificado como Mollic Udifluvents (Soil Survey Staff, 2006), está ubicado en el fondo de la cuenca del río Paute, donde las condiciones de clima más seco hacen que la saturación de bases sea muy alta (> 90 %) (Winckell, *et al.*, 1997b; MIDENA, *et al.*, 2013i).

Cabe indicar que estos fondos de cuencas están relativamente cercanos a las vertientes inferiores, con condiciones climáticas y altitudinales similares. El sistema agrícola dominante está basado en la típica asociación maíz-fréjol y praderas (Winckell, *et al.*, 1997b).



Figura 3.34. Perfil de suelo clasificado como Vertic Haplustolls (izquierda) ubicado en Cuenca, Azuay, sobre un valle fluvial con una pendiente < 5 % (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016).

Cuadro 3.25. Características del perfil de suelo clasificado como Vertic Haplustolls (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-28	Color: gris (10YR 3/1) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: granular a bloques subangulares, friable, con fragmentos de grava media; pH: 6.5; materia orgánica: 4.9 %; CIC: 31 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 81 %.
Bw	28-45	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo con moteados rojos (5 YR 5/8); textura: arcilla pesada; estructura: bloques angulares, friable, con cantos rodados; pH: 6.7; materia orgánica: 2.2 %; CIC: 39 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 65 %.
C	45-70	Color primario: pardo (10YR 5/2) en húmedo; color secundario negro (10YR 2/1); moteados rojos (5YR 5/8); textura: arcilla pesada; estructura: masiva.

3.4. Suelos de los Andes Meridionales (Sierra Sur)

La delimitación de los paisajes de la Sierra Austral es muy particular. El primer nivel de diferenciación es clima-fisiográfico, debido a que existe una alta correlación entre el tipo de suelo con la gradiente climática, condición que arregla los paisajes en tres grandes conjuntos morfo-edafológicos: a) Macizos Húmedos, b) Vertientes de Transición y c) Zonas Bajas con Sequía Acentuada. Es también importante observar las relaciones entre los tipos de roca y sus alteraciones en la formación de los suelos para entender algunas de las anomalías aparentes de la distribución de los paisajes. Esta relación permite dividir los paisajes en cuatro grandes tipos: a) Granitos, b) Formaciones Metamórficas (volcánicas o volcano-sedimentarias), c) Sedimentos Terciarios y d) Depósitos Coluviales de Glacis. Asimismo, varias generaciones de alteritas y suelos consolidados, ordenados en paleo-topo-climo secuencias, cubren los relieves actuales en una secuencia de suelos ferralíticos-fersialíticos. En síntesis, los suelos de la Sierra Austral tienen una secuencia climática sobrepuesta a una paleosecuencia: en altura se formaron suelos fersialíticos, saturados, ricos en minerales 2:1, con rastros de minerales 1:1 que se juntan con paleosuelos ferralíticos desaturados; en cambio, en las zonas bajas se observan principalmente Vertisoles, a menudo poco evolucionados por erosión, circundados por los paleosuelos fersialíticos (Zebrowski and Sourdat, 1997).

3.4.1. Relieves de la Sierra Sur

Los suelos de esta unidad están ubicados en relieves abiertos, con grandes valles y depresiones ortogonales, donde la cordillera oriental es la única línea continua de relieve (**Figura 3.35**). Las cimas de los paisajes son altas (> 2 800 m s. n. m.) y el punto de mayor altura alcanza 3 791 m s. n. m. en las proximidades de la frontera con Perú. A partir de esta barrera, la altitud disminuye en dirección Oeste y Noroeste (**Figura 3.36**). Los modelados son siempre impresionantes y cerca de la línea divisoria de aguas se localiza un estrecho rosario de relieves glaciares. Este gran macizo es solamente atravesado por dos escotaduras: la garganta del valle del río Zamora a 1 800 m s. n. m. y la brecha sur a 2 800 m s. n. m. (Winckell, *et al.*, 1997b).

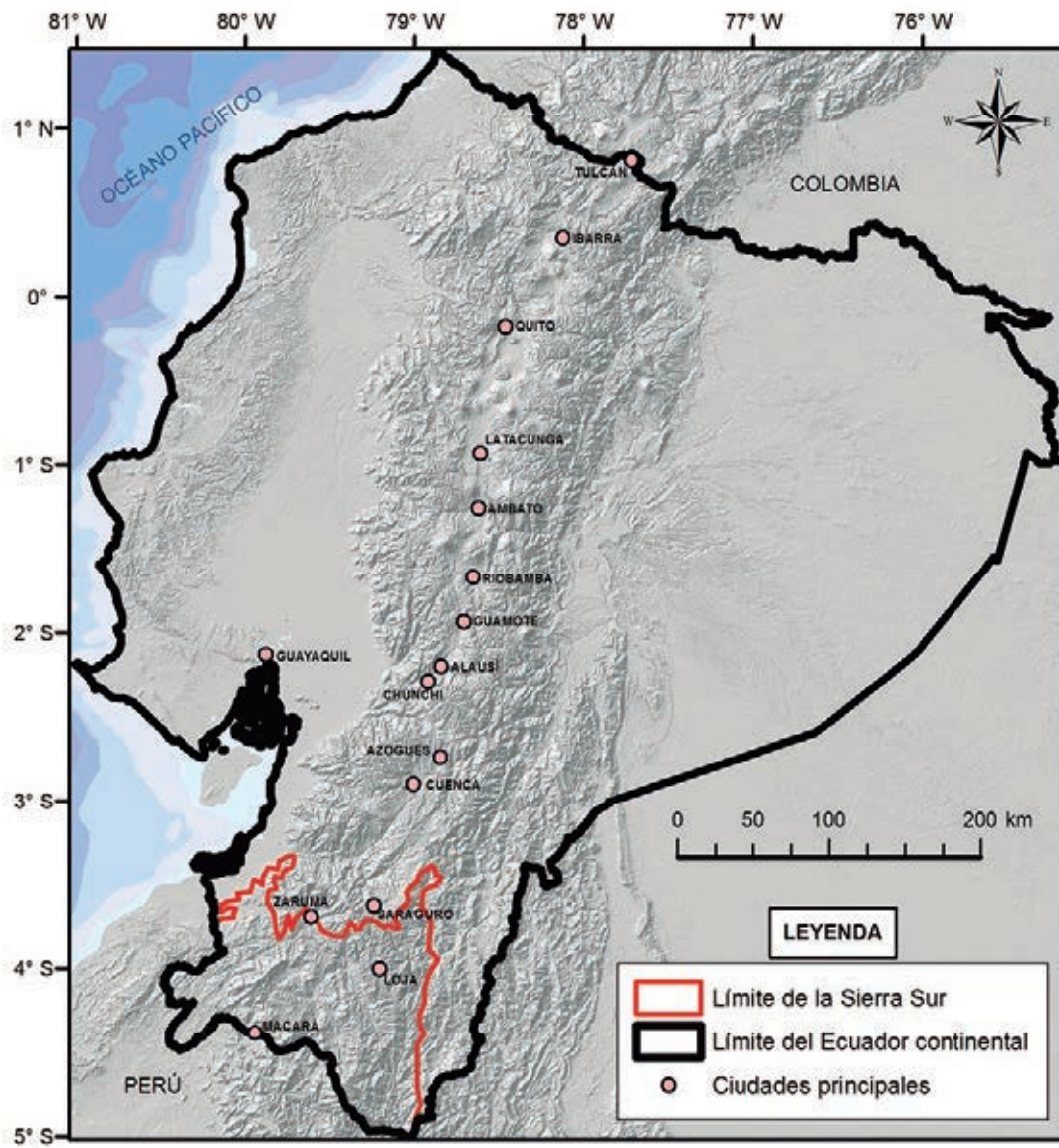


Figura 3.35. Ubicación de la Sierra Sur con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Winckell, *et al.* (1997b).

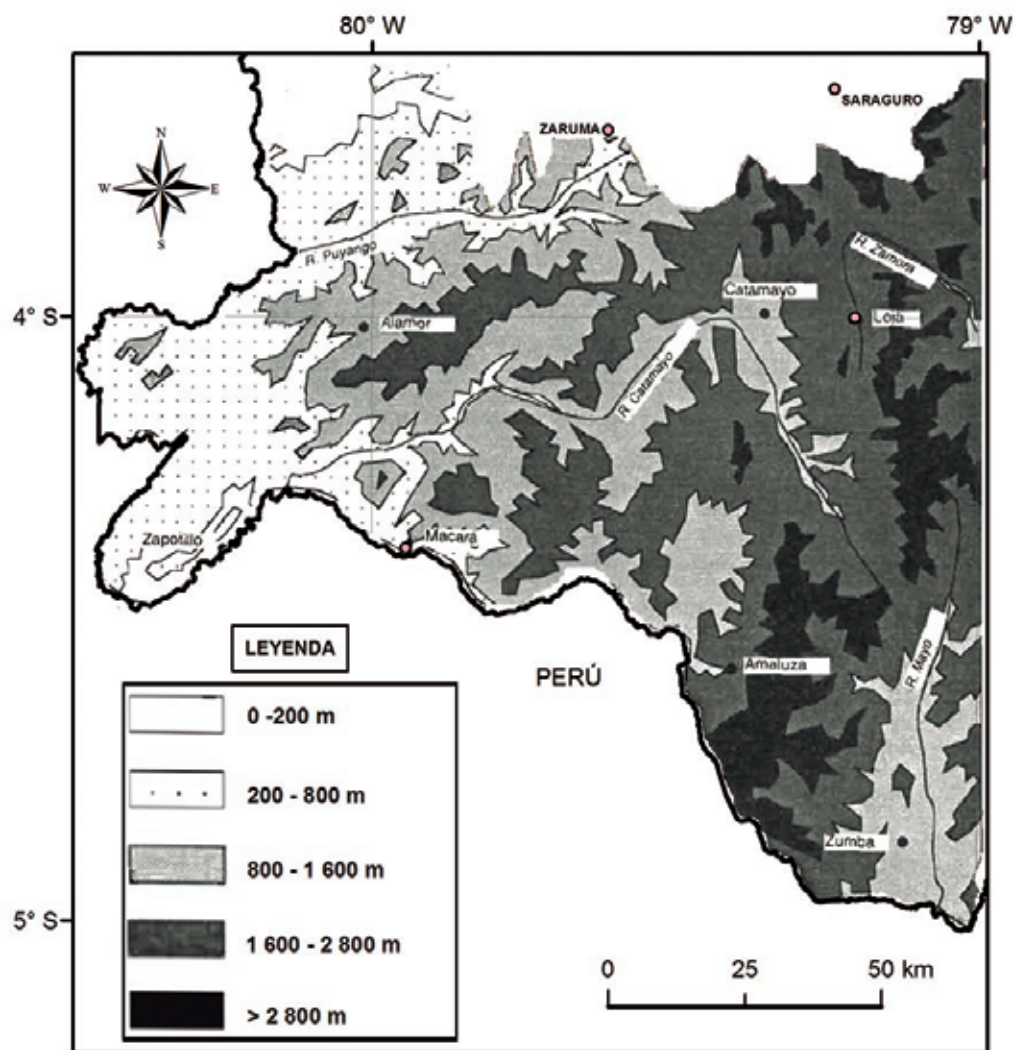


Figura 3.36. Zonas altimétricas de la Sierra Sur (Winckell, *et al.*, 1997b).

3.4.2. Geología y Clima

En la Sierra Sur no existe actividad volcánica reciente (post-oligocena) como existe en la Sierra Norte, lo que se traduce en la ausencia de proyecciones piroclásticas superficiales y las formaciones superficiales se derivan exclusivamente de las transformaciones del substrato. Los macizos australes presentan una litología de facies metamórficas, intrusivas, graníticas, volcánicas y volcano-sedimentarias, complementados con la presencia de algunos depósitos sedimentarios muy localizados (Figura 3.37) (Winckell, *et al.*, 1997b).

El clima de la Sierra Sur guarda estrecha relación con la altimetría (Figura 3.38). En la parte alta, las cimas son muy húmedas y las laderas son húmedas, pero las precipitaciones se reducen a medida que disminuye la altitud y los valles y cuencas tienen pisos climáticos muy secos y hasta áridos (Winckell, *et al.*, 1997b; MIDENA, *et al.*, 2013g, 2013h, 2013c, 2013d, 2013a).

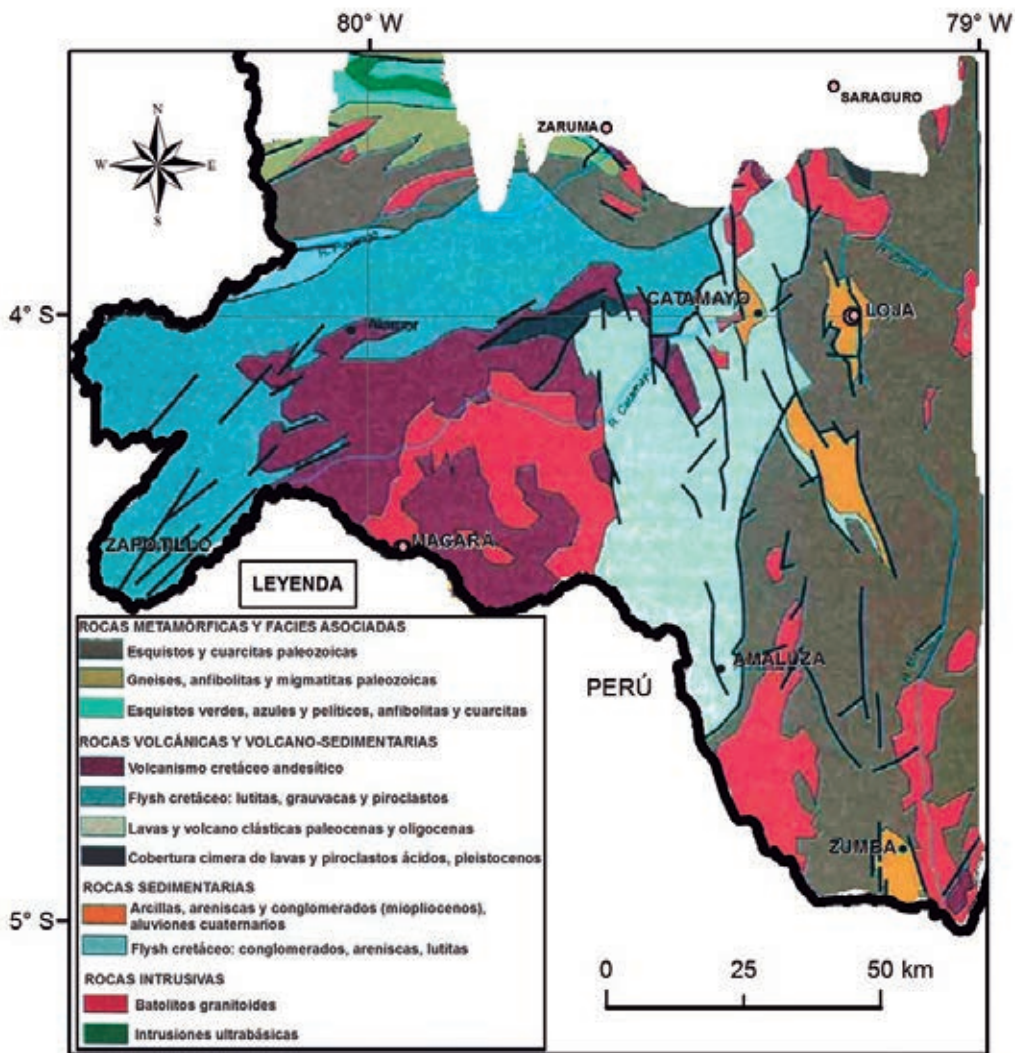


Figura 3.37. Formaciones litológicas de la Sierra Sur. Adaptado de Winckell, *et al.* (1997b).

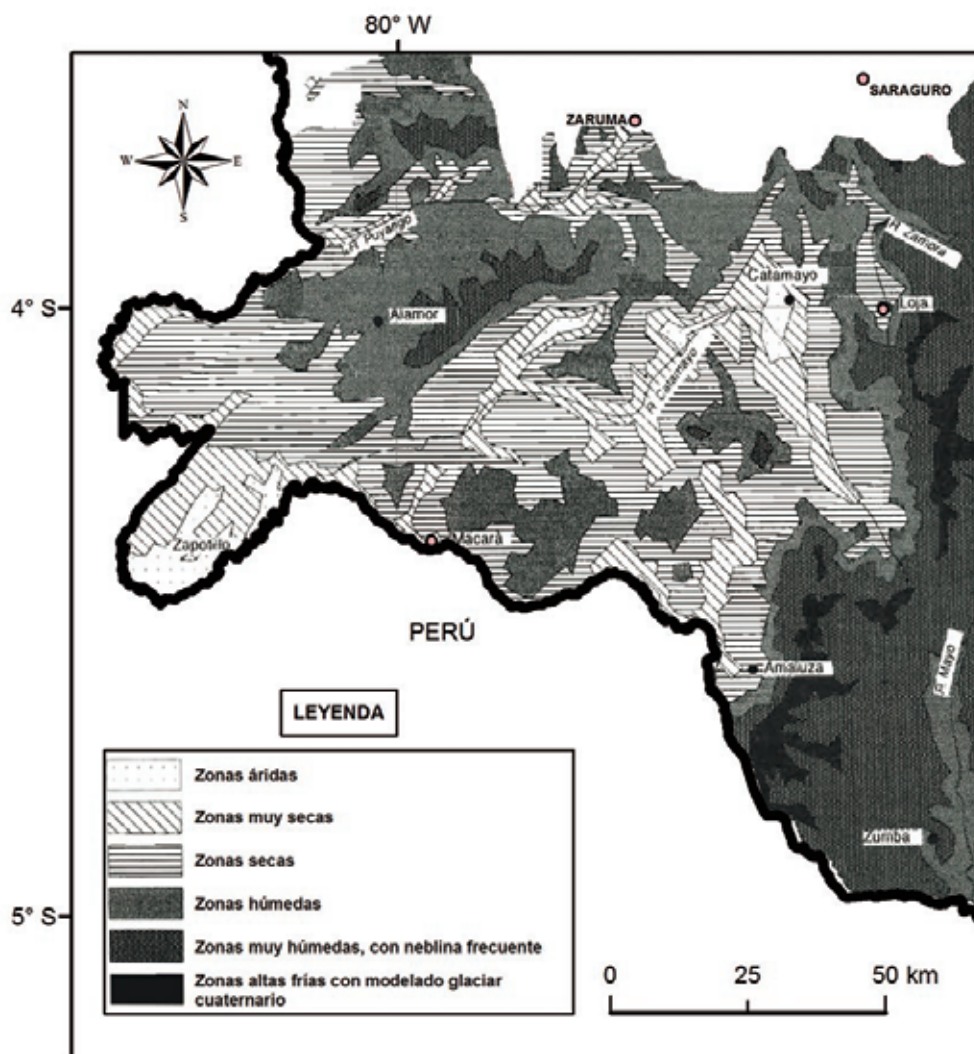


Figura 3.38. Zonas de humedad de la Sierra Austral. Adaptado de Winckell, *et al.* (1997b).

Debido a sus características particulares y su complejidad es mejor describir los suelos de la Sierra Sur agrupándolos en tres grandes paisajes: a) Partes Altas de los Macizos; b) Partes Medias e Inferiores de las Vertientes y; c) Fondos de Cuencas (valles).

3.4.3. Partes Superiores de los Macizos

Las partes cimaras y superiores húmedas no son extensas y bajo la influencia de las circulaciones pacíficas o amazónicas subsiste la selva perennifolia característica de las vertientes altas. En la parte superior de las posiciones interandinas las vertientes están cubiertas por la vegetación de matorral, pero más abajo están cubiertas por asociaciones complejas de vegetación arbórea, arbustiva o herbácea asociadas con

grandes zonas erosionadas. En los sectores más húmedos dominan los pastizales, mientras las vertientes interandinas más abrigadas están ocupadas por cultivos de subsistencia (principalmente la asociación maíz-yuca) y caña de azúcar para alcohol y panela. En la vertiente occidental, completamente expuesta a las circulaciones pacíficas, se encuentran asociaciones de pastos cultivados con cultivos tropicales perennes (café, naranja) y caña de azúcar con cultivos de subsistencia (maíz, yuca). Por otro lado, la existencia de una intensa dinámica paleo-morfológica sobre estos paisajes dejó huellas indelebles en sus formas y formaciones superficiales. Estos paisajes, heredados de un periodo más húmedo, están hoy totalmente recolonizadas por la vegetación y están generalmente estabilizados. Estas condiciones son claramente evidentes en los paisajes por la presencia de manchas rojizas cuando están sobre alteritas ferralíticas antiguas o café-amarillentas a blanquecinas cuando se trata de formaciones superficiales actuales (Winckell, *et al.*, 1997b; Zebrowski and Sourdat, 1997; MIDENA, *et al.*, 2013g; IGM, 2019b). Estos paisajes presentan características climáticas relativamente homogéneas. Las zonas más húmedas, localizadas cerca de la cordillera oriental, tienen entre 1 y 2 meses secos (por ejemplo, Yangana), el sector central tiene 4 meses secos y la parte occidental de 6 a 8 meses secos (Winckell, *et al.*, 1997b; MIDENA, *et al.*, 2013c, 2013d).

La herencia geológica y la litología del basamento de esta zona afectaron la distribución de las formaciones superficiales, así como la de los suelos, haciendo que sean comunes los suelos desarrollados principalmente sobre litografía volcánica y volcano-sedimentaria, accesoriamente metamórfica, pero se presentan también suelos desarrollados sobre basamento granítico (MIDENA, *et al.*, 2013c, 2013d). Sobre las rocas volcánicas y volcano-sedimentarias predominan suelos clasificados como Inceptisoles y Ultisoles (Soil Survey Staff, 2006), siendo los segundos los más antiguos (paleosuelos) (IGM, 2019a). Dentro de los Inceptisoles se encuentran los suelos clasificados como Oxic Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 3.39** y **Cuadro 3.26**) sobre los cuales se cultiva maíz y maní, productos que dinamizan la economía del lugar y que luego se alternan con pastizales en la época seca (IGM, 2019a).



Figura 3.39. Perfil de suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (izquierda), con colores pardos en la superficie y rojo amarillentos a profundidad, localizado en un relieve colinado muy alto en Zapallas, La Tingue, Loja (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013s).

Cuadro 3.26. Características del perfil de suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (MIDENA, *et al.*, 2013s).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-16	Color en húmedo: pardo oscuro (7.5YR 3/4); color en seco: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: arcilla pesada; estructura: granular a bloques subangulares, firme; pH: 5.2; materia orgánica: 6.6 %; CIC: 23 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 46 %.
Bw	16-29	Color: rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo; textura: arcilla pesada; estructura: bloques subangulares, firme, con fragmentos de grava media; pH: 5.1; materia orgánica: 2.5 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 41 %.
Cr	29-100+	Color primario: rojo (2.5YR 4/8); color secundario: pardo fuerte(7.5YR 5/8) en húmedo; textura: arcilla pesada; estructura: masiva, firme, con fragmentos de grava gruesa.

También se han identificado en esta zona suelos muy antiguos (paleosuelos), clasificados como Ultisoles (Soil Survey Staff, 2006), que se caracterizan por tener un horizonte Bt, baja saturación de bases y alta acidez, lo que indica que se desarrollaron en una época con más humedad que la actual. El perfil de un suelo representativo de estos paleosuelos se presenta en la **Figura 3.40** y el **Cuadro 3.27**.



Figura 3.40. Perfil de suelo clasificado como Humic Hapludults (izquierda) en el cual es evidente la presencia de un horizonte Bt de color pardo oscuro. El suelo está ubicado en un relieve montañoso de Loma México, Guachamana, Paltas, Loja sobre el cual se cultiva de maíz y se mantienen pastizales (MIDENA, *et al.*, 2013q).

Cuadro 3.27. Características del perfil de suelo clasificado como Humic Hapludults (MIDENA, *et al.*, 2013q).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo: pardo oscuro (7.5YR 3/4); color en seco: pardo amarillento (10YR 5/4); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares, firme, con fragmentos de grava media; pH: 6.0; materia orgánica: 5.4 %; CIC: 26 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 54 %.
Bt	20-45	Color: pardo oscuro (7.5YR 3/4) en húmedo; textura: arcilla pesada; estructura: bloques subangulares, friable, con fragmentos de grava fina; pH: 6.1; materia orgánica: 2.8 %; CIC: 24 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 30 %.
Ct	45-95	Color primario: amarillo rojizo (7.5YR 6/8) en húmedo; color secundario amarillo (5YR 5/8) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: masiva, firme, con fragmentos de grava gruesa; pH: 5.4; materia orgánica: 0.5 %.

3.4.4. Partes Medias e Inferiores de las Vertientes

Debido a sus características climáticas más secas, este piso intermedio tiene facies que están cubiertas con vegetación que va de arbustiva relativamente abierta a vegetación espinosa casi cerrada. En estas áreas se cultiva maíz asociado con otros cultivos de subsistencia como el maní. En las partes superiores, menos secas, los pastizales ocupan extensiones mayores. En las partes inferiores, más secas, aparecen asociaciones de maíz, caña de azúcar y yuca (Winckell, *et al.*, 1997b; MIDENA, *et al.*, 2013a; IGM, 2019b). En estos paisajes existen áreas muy erosionadas debido a que la cobertura vegetal es pobre y discontinua producto del clima seco a muy seco y porque están ubicados en pendientes generalmente > al 40 % (Winckell, *et al.*, 1997b).

Por otro lado, estos paisajes se subdividen en forma relativamente sencilla, por un lado, la roca madre juega un papel dominante (se distinguen los paisajes sobre granitos), mientras que la gradiente climática distingue, a su vez, las partes intermedias, de condiciones secas, de las inferiores que son muy secas (MIDENA, *et al.*, 2013a).

Los suelos que predominan en esta parte de las vertientes son principalmente Inceptisoles, seguidos de Entisoles. Estos son suelos de tonalidades rojizas, cafés o amarillentas, según la composición de las formaciones superficiales (Zebrowski and Sourdat, 1997; MIDENA, *et al.*, 2013e). En la **Figura 3.41** y en el **Cuadro 3.28** se presenta el perfil de un suelo clasificado como Udic Haplustepts (Soil Survey Staff, 2006), desarrollado sobre rocas de volcanismo antiguo y rocas metamórficas. Estos Inceptisoles son poco profundos, tienen texturas franco arcillosas y presencia de grava media en todo el perfil (MIDENA, *et al.*, 2013e).



Figura 3.41. Perfil del suelo clasificado como Udic Haplustepts (izquierda) en Naypicara, Alamor, Loja, ubicado sobre un relieve colinado (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013r).

Cuadro 3.28. Características del perfil de suelo clasificado como Udic Haplustepts (MIDENA, *et al.*, 2013r).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); color en seco: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: arcilloso; estructura: bloques subangulares, muy firme, con fragmentos de grava fina; pH: 6.5; materia orgánica: 5.6 %; CIC: 28 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 86 %.
Bw	20-45	Color: negro (7.5YR 2.5/1) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares, muy firme, con fragmentos de grava fina; pH: 6.7; materia orgánica: 3.2 %; CIC: 32 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 75 %.
BC	45-56	Color: pardo fuerte (7.5YR 4/6) en húmedo; textura: arcillo limosa; estructura: bloques subangulares a masiva, firme, con fragmentos de grava fina; pH: 6.1; materia orgánica: 1.1 %.
C	56-100+	Color: pardo fuerte (7.5YR 5/8) en húmedo; textura: arcilla; estructura: masiva, firme, con fragmentos de grava fina.

Por otro lado, los Entisoles de esta zona son suelos que tienen contacto con roca continua a 50 cm de profundidad, lo que restringe el crecimiento de las diferentes especies vegetales que se desarrollan sobre ellos, por esta razón, estos suelos están cubiertos por vegetación herbácea seca muy alterada que no cubre bien la superficie, lo que facilita los procesos erosivos. Un suelo representativo de estos Entisoles es el clasificado como Lithic Ustorthents (Soil Survey Staff, 2006) que se presenta en la **Figura 3.42** y en el **Cuadro 3.29**.

**Figura 3.42.** Perfil del suelo clasificado como Lithic Ustorthents (izquierda) en Las Limas, Espíndola, Loja, ubicado sobre un relieve colinado alto (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013m).**Cuadro 3.29.** Características del perfil de suelo clasificado como Lithic Ustorthents (MIDENA, *et al.*, 2013m).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-8	Color: pardo rojizo oscuro (5YR 3/2) en húmedo; textura: franca; estructura: granular a bloques subangulares, friable, con fragmentos de grava media; pH: 6.9; materia orgánica: 4.0 %; CIC: 32 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 81 %.
Cr	8-50	Roca meteorizada
R	50+	Roca

3.4.5. Fondos de Cuencas

La temperatura media anual de los fondos de los valles bajos es $> 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, ejemplos son Macará con $24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 430 m s. n. m. y La Toma con $23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 1 240 m s. n. m., mientras que en las cuencas más elevadas, como Loja, la temperatura media anual es de $\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 2 140 m s. n. m. En general, la precipitación se relaciona bien con la temperatura, las zonas más húmedas corresponden a las partes más altas y frescas como Loja, con una precipitación media anual de 910 mm y de 1 a 3 meses secos, mientras que las zonas bajas son secas o muy secas como el caso de Macará con 670 mm y 11 meses secos. En los valles ubicados en los pisos intermedios hay más variación: existen sectores secos y sectores húmedos, por ejemplo, la precipitación media anual de Río Pindo es de 1 465 mm (Winckell, *et al.*, 1997b; MIDENA, *et al.*, 2013b).

En los valles bajos, caracterizados por cuencas sedimentarias de entalladuras fluviales, las condiciones climáticas muy secas y hasta áridas permiten solamente el desarrollo de una cobertura vegetal arbustiva y espinosa adaptada a la zona. En el margen superior de las cuencas bajas se cultiva maíz en asociación con pastos porque las condiciones climáticas son menos drásticas. Sin embargo, la actividad agrícola de las zonas irrigadas como las del valle del río Catamayo, alrededor de Vilcabamba, Malacatos y Catamayo, es significativa, con producción intensa de caña de azúcar, banano, cítricos, café, yuca y maíz. En el valle de Catamayo se ubica, sobre tierras planas del relleno aluvial reciente, el ingenio azucarero de La Toma irrigado con las aguas de los ríos Guayabal y Catamayo (Winckell, *et al.*, 1997b; IGM, 2019b).

El régimen climático muy seco y la erosión de la zona han promovido la presencia de amplias áreas con Entisoles caracterizados por el afloramiento de formaciones arenosas, pedregosas y rocosas. Estos son paisajes minerales estériles, como los de la cuenca del río Playas o aguas arriba en el valle del río Catamayo, donde se observan zonas de aspecto desolado, debido, principalmente a las características climáticas de áreas muy secas a áridas y a la existencia de formaciones sedimentarias con dominancia detrítica que va de areno-pedregosa a conglomerática, lo que genera suelos poco espesos, livianos y sin coherencia (Winckell, *et al.*, 1997b). En cambio, la cuenca de Loja, que goza de un clima más húmedo, tiene suelos arcillosos, clasificados como Vertisoles (Soil Survey Staff, 2006). Un ejemplo de este tipo de suelos es el clasificado como Leptic Hapluderts que se presenta en la **Figura 3.43** y en el **Cuadro 3.30** (MIDENA, *et al.*, 2013f).



Figura 3.43. Perfil del suelo clasificado como Leptic Hapluderts (izquierda) ubicado en el sitio Tenería, Loja, sobre el cual se cultivan pastos (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013k).

Cuadro 3.30. Características del perfil de suelo clasificado como Leptic Hapluderts (MIDENA, *et al.*, 2013k).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A _{pss}	0-20	Color: gris muy oscuro (2.5Y 3/1) en húmedo, con moteado pardo fuerte (7.5YR 5/8); textura: franco arcillo arenosa; estructura: masiva, firme; pH: 5.7; materia orgánica: 3.5 %; CIC: 14 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 47 %.
A _{Css}	20-50	Color principal: gris muy oscuro (2.5Y 3/1), con moteado pardo fuerte (7.5YR 4/6); color secundario: pardo grisáceo oscuro (2.5Y 4/2); textura: franco arcillosa; estructura: masiva, firme, con fragmentos tipo piedra; pH: 5.8; materia orgánica: 1.6 %; CIC: 13 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 61 %.
C _{ss}	50-70	Color: gris muy oscuro (2.5Y 3/1) en húmedo, con moteado pardo fuerte (7.5YR 5/8); textura arcillosa; estructura: masiva, porosa, firme, con fragmentos tipo piedra; pH: 5.5; materia orgánica: 1.3 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 54 %.
Cr	70-80+	Color: gris muy oscuro (2.5Y 3/1) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: masiva, muy firme, con fragmentos tipo piedra.

En zonas moderadamente húmedas se pueden observar Inceptisoles con saturación de bases > al 50 %, clasificados como Eutrudepts (**Figura 3.44** y en el **Cuadro 3.31**) (MIDENA, *et al.*, 2013f).



Figura 3.44. Perfil del suelo clasificado como Fluventic Eutrudepts (izquierda) ubicado en el sitio Tumianuma, Vilcabamba, Loja, sobre una terraza media en el cual se cultiva caña de azúcar (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013t).

Cuadro 3.31. Características del perfil de suelo clasificado como Fluventic Eutrudepts (MIDENA, *et al.*, 2013t).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color principal: gris muy oscuro (2.5Y 3/1) en húmedo; color secundario: pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y 3/2) en húmedo; textura: arcillo limosa; estructura: bloques subangulares a masiva, firme; pH: 6.4; materia orgánica: 3.7 %; CIC: 25 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 86 %.
Bw	20-50	Color primario: oliva (5Y 5/3) en húmedo; color secundario: pardo oliva claro (2.5Y 5/4) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares a masiva, friable; pH: 6.4; materia orgánica: 0.7 %; CIC: 16 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 77 %.
C	50-70	Color: pardo oliva (2.5Y 4/3) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: masiva, porosa, suelta; pH: 6.4; materia orgánica: 0.4 %; CIC: 12 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 77 %.
2Ab	70-90	Color: oliva (5Y 5/3) en húmedo, con moteados pardo fuerte (7.5YR 4/6); textura: franco arenosa; estructura: masiva, friable, con fragmentos de grava gruesa; pH: 6.4; materia orgánica: 0.4 %; CIC: 12 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 75 %.
2C	90-100	Color principal: pardo oliva (2.5Y 4/4) en húmedo; color secundario: pardo oliva oscuro (2.5Y 3/3) en húmedo; textura: arenosa; estructura: masiva, grano simple, suelto, con fragmentos de tipo piedra.

3.5. Referencias bibliográficas

- Beltrán, K., S. Salgado, F. Cuesta., S. León-Yáñez, K. Romoleroux, E. Ortiz, *et al.* 2009. Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los Páramos en el Ecuador. Quito. EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA. Quito, Ecuador.
- Cañadas, L. 1983. El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. Editores Asociados. Quito, Ecuador.
- Creutzberg, D., J. Kauffman, E. Bridges y G. del Posso. 1990. Micromorphology of “Cangahua”: a cemented subsurface horizon in soils from Ecuador. *Developments in Soils Science* 19: 367-372. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70349-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70349-0)
- Custode, E., G. Trujillo, C. Valarezo y A. Voope. 1999. La degradación del suelo y los cambios históricos. Consorcio CAMAREN. Quito, Ecuador.
- De Bievre, B., V. Iñiguez y W. Buytaert. 2011. Hidrología del páramo: Inportancia , propiedades y vulnerabilidad En: P. Mena, A. Castillo, S. Flores, R. Hofstede, C. Josse, S. Lasso, G. Medina, N. Ochoa y D. Ortiz (eds). Páramo. Abya Yala. Quito, Ecuador.
- Derruau, M. y J. de Noni. 1982. La geomorfología de los piroclastos en los Andes del Ecuador. CEG - IPGH - CEIG - ORSTOM. Quito, Ecuador.
- Holdridge, L. 1969. Life zone ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica.
- Huttel, C., C. Zebronski, P. Gondard y J. Bourliaud. 1999. Paisajes agrarios de Ecuador. IFEA-IGM-IPGH-IRD-PUCE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kozCEL>
- IGM. 2013. Atlas geográfico de la República del Ecuador. IGM-SENPLADES. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2W9Wnug>
- IGM. 2019a. Geovisualizador Instituto Geográfico Militar. Mosaico de Geopedología 1:25.000. Disponible en <https://bit.ly/2ITzM6Z>

- IGM. 2019b. Geovisualizador Instituto Geográfico Militar. Mosaico de Uso de la Tierra 1:25.000. Disponible en <https://bit.ly/2ITzM6Z>
- INEC. 2018. Estadísticas Agropecuarias. Disponible en <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- IRD, IGM y EPN. 2012. Volcanes cuaternarios del Ecuador continental. IGM. Quito, Ecuador.
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015. Perfil CSp-ÑV_E4-83-0061. Memoria técnica del cantón Gualaceo. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2Cotrp2>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016. Anexo 5: Perfil CSp-NV_F4-90-0016. Memoria técnica del cantón Cuenca. Geopedología y temáticas derivadas. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/36OAHIK>
- Mejía, L. 1997. Suelos del Ecuador: Reconocimiento general en base a su capacidad-fertilidad y mapa general de clasificación por Capacidad-Fertilidad de los suelos del Ecuador: Una interpretación básica sobre las características de los suelos del Ecuador. FFJMD-INPOFOS-IGM-IPGH-SECS. Quito, Ecuador.
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2012a. Perfil PM3-P038. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2WpJJHw>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2012b. Perfil PM4-P041: Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2BIsSWI>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013a. Memoria técnica de clima e hidrología del cantón Espíndola. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2NZ4XYL>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013b. Memoria técnica de clima e hidrología del cantón Loja. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2Nw0BrQ>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013c. Memoria técnica de clima e hidrología del cantón Olmedo. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2K7bFuJ>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013d. Memoria técnica de clima e hidrología del cantón Paltas. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2K7FZW9>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013e. Memoria técnica de geopedología del cantón Espíndola. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador.
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013f. Memoria técnica de geopedología del cantón Loja. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/333HlIT>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013g. Memoria técnica de geopedología del cantón Olmedo. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/33z0TVZ>

- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013h. Memoria técnica de geopedología del cantón Paltas. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2X0A6zk>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013i. Memoria técnica de geopedología del cantón SigSig. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2PXZtAc>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013j. Memoria técnica geopedológica del cantón Colta. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013k. Perfil PM2-P158. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2Q4PB7X>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013l. Perfil PM2-P180. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/34632rX>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013m. Perfil PM4-P178. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2KayHkx>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013n. Perfil PN1-P094: Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2pRwdjE>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013o. Perfil PN2-P086. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2BM5kjP>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013p. Perfil PN4-P108. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2CF65Mh>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013q. Perfil PN5-P167. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2O1KF12>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013r. Perfil PN5-P169. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2X3Rymn>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013s. Perfil PN5-P177. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2NCJ1nn>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013t. Perfil PN6-P147. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/32BhiaY>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013u. Perfil PN9-P093. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/33x6lZx>

- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013v. Perfil PN9-P099. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2JWwVmL>.
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013w. Perfil PN9-P110. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2Npxl7q>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2014a. Perfil PM1-P204. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/36dknku>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2014b. Perfil PM2-P190. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2p6F2pZ>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2014c. Perfil PM5-P060. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2Wsum0V>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2014d. Perfil PN1-P204. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2BY5QLO>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2014e. Perfil PN1-P224: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. <http://bit.ly/2qJYb1l>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2014f. Perfil PN8-P211. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2BX9Mwj>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2015a. Memoria técnica de geopedología del cantón Ibarra. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador.
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013x. Memoria técnica de geopedología del cantón San Miguel de los Bancos. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador.
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013y. Memoria técnica geopedológica del cantón Cayambe. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/366ug3p>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013z. Perfil PM3-P144. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/344DLOV>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013aa. Perfil PM5-P028. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2MOrdFD>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013ab. Perfil PM5-P039. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/343dPDm>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013ac. Perfil PN1-124: Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/31GdvIZ>

- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013ad. Perfil PN1-P133. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/369ikxR>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013ae. Perfil PN1-P154. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2MNsmx2>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013af. Perfil PN2-P115. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2NnA5B1>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013ag. Perfil PN2-P138. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2pQsa7e>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD de Pichincha. 2013ah. Perfil PN4-P122. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2PE0M7x>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y MAGAP. 2012c. Memoria técnica geopedológica del cantón Chambo. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador.
- MIDENA, SENPLADES, IEE y MAGAP. 2015b. Memoria técnica de geopedología del cantón Tulcán. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador.
- Pacheco, R. 2009. El Ecuador: Recursos naturales agrícolas y del medio ambiente. Imprenta Colón. Quito, Ecuador.
- Poulenard, J., P. Podwojewski and A.J. Herbillon. 2003. Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma* 117(3): 267-281. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9).
- PROECUADOR. 2019. Evolución de las exportaciones flores y plantas. Disponible en <https://www.proecuador.gob.ec/monitoreo-de-exportaciones/>
- PRONAREG-ORSTOM. 1982. Inventario cartográfico de la Sierra ecuatoriana: mapas de aptitudes agrícolas, escala 1: 200 000, Quito, Ecuador. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG), Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer (ORSTOM). Quito, Ecuador.
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to soil taxonomy. 10th ed. USDA - NRCS. Washington DC, USA. <http://bit.ly/2kEtubf>
- Sollins, P. 1991. Effects of soil microstructure on phosphorus sorption in soils of the humid tropics. In: D. Tielsen, D. Hernandez and L. Salcedo (eds). Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. Saskatchewan Institute of Pedology. Saskatoon, Canada.
- Steinmann, M., D. Hungerbühler, D. Seward and W. Winkler. 1999. Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics* 307(3): 255-279. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00100-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00100-6).
- Vallejo, C. 2007. Evolution of the western cordillera in the Andes of Ecuador (late Cretaceous-Paleogene). Swiss Federal Institute of Technology. Doctor of Natural Sciences. Zürich, Switzerland.p
- Wada, K. and Y. Kakuto. 1985. Embryonic halloysites in Ecuadorian soils derived from volcanic ash. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49(5): 1309-1318. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900050047x>

- Winckell, A., R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski, *et al.* (ed). 1997a. Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/39KCznr>
- Winckell, A., C. Zebrowski y M. Sourdat. 1997b. Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 2: Las regiones y paisajes del Ecuador. CEDIG-IPGH-IRD-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2moNqiM>
- Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (ed). 1997. Suelos volcánicos endurecidos. III Simposio Internacional UE-ORSTOM-PUCE-UCE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/34aWOqZ>
- Zebrowski, C. y M. Sourdat. 1997. Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador. En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2kory6p>
- Zehetner, F., W. Miller and L. West. 2003. Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Sci. Soc. Am. J* 67(1): 1797-1809. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1797>.

—SUELOS— DEL ORIENTE

Darwin Sánchez, Ministerio de Agricultura y Ganadería: dsanchezr@mag.gob.ec

José Merlo, Palmeras de los Andes: jmerlo@danec.com

Renato Haro, Consultor: renoharo@hotmail.com

Mayra Acosta, Servicio Nacional de Contratación Pública -SERCOP: mayra.acosta@sercop.gob.ec

Gustavo Bernal, Consultor: gusrbg@yahoo.com

RESUMEN

La Amazonía Ecuatoriana es la parte de la cuenca Amazónica que linda con la cordillera de los Andes en su sector más volcánico. Estos paisajes se extienden desde las áreas adyacentes a los Andes hasta el límite político con Perú y Colombia hacia el este y noreste, respectivamente. Esta es una región única formada por el arreglo de diversas estructuras geológicas y por los cambios en clima que la región ha sufrido a través de tiempos geológicos. Los relieves amazónicos se caracterizan por un decrecimiento paulatino de altitud de oeste a este que se asemeja a gradas, generando dos paisajes característicos: a) Relieves Subandinos que comprenden los Corredores, Cordilleras y Contrafuertes; y b) Amazonía Periandina, con las Colinas Periandinas y Piedemontes y los Ambientes Fluviales. En los relieves Subandinos las fuertes pendientes van desde 3 000 hasta los 600 m s. n. m., mientras que los relieves periandinos están localizados a alturas menores a los 600 m s. n. m. Los suelos de la zona norte de los relieves subandinos son suelos derivados de cenizas volcánicas, mientras que, al sur, las rocas antiguas, sin recubrimiento de ceniza volcánica, han dado lugar a suelos ácidos, de texturas finas, pardo rojizos y con alto contenido de aluminio intercambiable. Más de dos tercios de la Amazonía Periandina tiene suelos rojos bien drenados, ácidos, arcillosos y altamente lixiviados desarrollados de sedimentos terciarios, mientras que la sección noreste se desarrolló sobre sedimentos cuaternarios que fueron cubiertos por ceniza volcánica desarrollando Andisoles. Las áreas con influencia fluvial tienen suelos arcillo limosos de color gris, pobremente drenados.

ABSTRACT

The Ecuadorian Amazonia is the part of the great Amazonia Basin, which borders with the Andes Mountain range at the sector with more volcanic past. These landscapes extend from the Andes adjacent areas to the political border with Peru and Colombia to the east and northeast, respectively. This is a unique region which has been shaped by the arrangement of the geological structures and the climatic change that the region has suffered over geological times. The Amazonian reliefs are characterized by a gradual decrease in altitude from west to east resembling a set of stairs generating two characteristic landscapes: (a) Sub-Andean reliefs, which include corridors, mountain ranges and flanks; and (b) Peri-Andean Amazonia with Peri-Andean hills, and Piedmont and Fluvial Environments. In the Sub-Andean reliefs, the steep slopes range from 3 000 to 600 m o.s.l., while the Peri-Andean reliefs are located at attitudes lower than 600 m o.s.l. Soils from the northern Sub-Andean reliefs are derived from volcanic ash, while at the south, without volcanic ash cover, old rocks have developed acid, reddish brown, light textured soils with high aluminum content. More than two-thirds of the Peri-Andean Amazonia has acid, heavy textured, highly leached, red, well-drained soils developed from tertiary sediments, while the northeast section developed over quaternary sediments covered by volcanic ash developed Andisols. The areas with fluvial influence have poorly drained, silty clay, greyey soils

4.1. Introducción

Los Andes Septentrionales se levantaron en eventos sucesivos durante el Plioceno (aproximadamente hace 5 a 3 millones de años) formándose el gran macizo que actualmente tiene alturas que van de 4 000 a 6 000 m s. n. m. y que definió la zona de América del Sur conocida como Amazonía. El levantamiento de esta gran barrera en la región Amazónica afectó dramáticamente el clima y consolidó una amplia zona con altas precipitaciones. El proceso de estabilización de los relieves resultantes cambió radicalmente el sistema fluvial y se establecieron poblaciones de flora y fauna de alta diversidad y riqueza (Van der Hammen, *et al.*, 1973; Hoorn, *et al.*, 1995). La Amazonía ecuatoriana es la parte de la cuenca amazónica que linda con la cordillera de los Andes en su sector más volcánico. Esta es una región única, cuya forma fue definida por el ordenamiento de las estructuras geológicas y los cambios climáticos que la región ha sufrido a través del tiempo (**Figura 4.1**) (Custode y Sourdat, 1986).

4.1.1. Geología, geomorfología y vegetación

Al noroeste de la región Amazónica se distinguen relieves rocosos de montaña alta con afloramientos de rocas volcánicas, lavas, escombros, arenales, proyecciones de tobas y cenizas. Hacia las vertientes periandinas se pueden apreciar esquistos meteorizados y areniscas recubiertas de ceniza volcánica. Algunos relieves estructurales son derivados de sedimentos del Cretácico (**Figura 4.2**). Hacia el centro de la región Amazónica se distinguen, en su mayoría, granitos cubiertos por capas de cenizas, sin embargo, hacia las zonas de mayor disectamiento se pueden encontrar basamentos dedríticos de bloques y cantos rodados de origen volcánico. Los principales limitantes de los suelos desarrollados en estos relieves son el exceso de humedad y la consecuente lixiviación de bases. En la Amazonía se pueden encontrar bosques primarios, bosques secundarios y zonas donde la vegetación natural ha sido reemplazada por pequeñas chacras de asentamientos indígenas y parcelas más grandes de los asentamientos humanos resultantes de la colonización (PRONAREG y ORSTOM, 1983b).

En la cuenca Amazónica (altitudes < 600 m s. n. m.) se pueden diferenciar las colinas y la parte plana (llanura). Las colinas son más o menos modeladas por la disección de bancos sedimentarios. Existen desde rocas íntegramente meteorizadas hasta cantos rodados blandos, cuyos minerales se han transformados en arcillas. En la parte plana se encuentra un relieve ligeramente ondulado, proveniente de material detrítico como cantos rodados y arenas. La vegetación predominante está constituida por bosques y pastizales (PRONAREG y ORSTOM, 1983b; Letamendi, *et al.*, 2007).

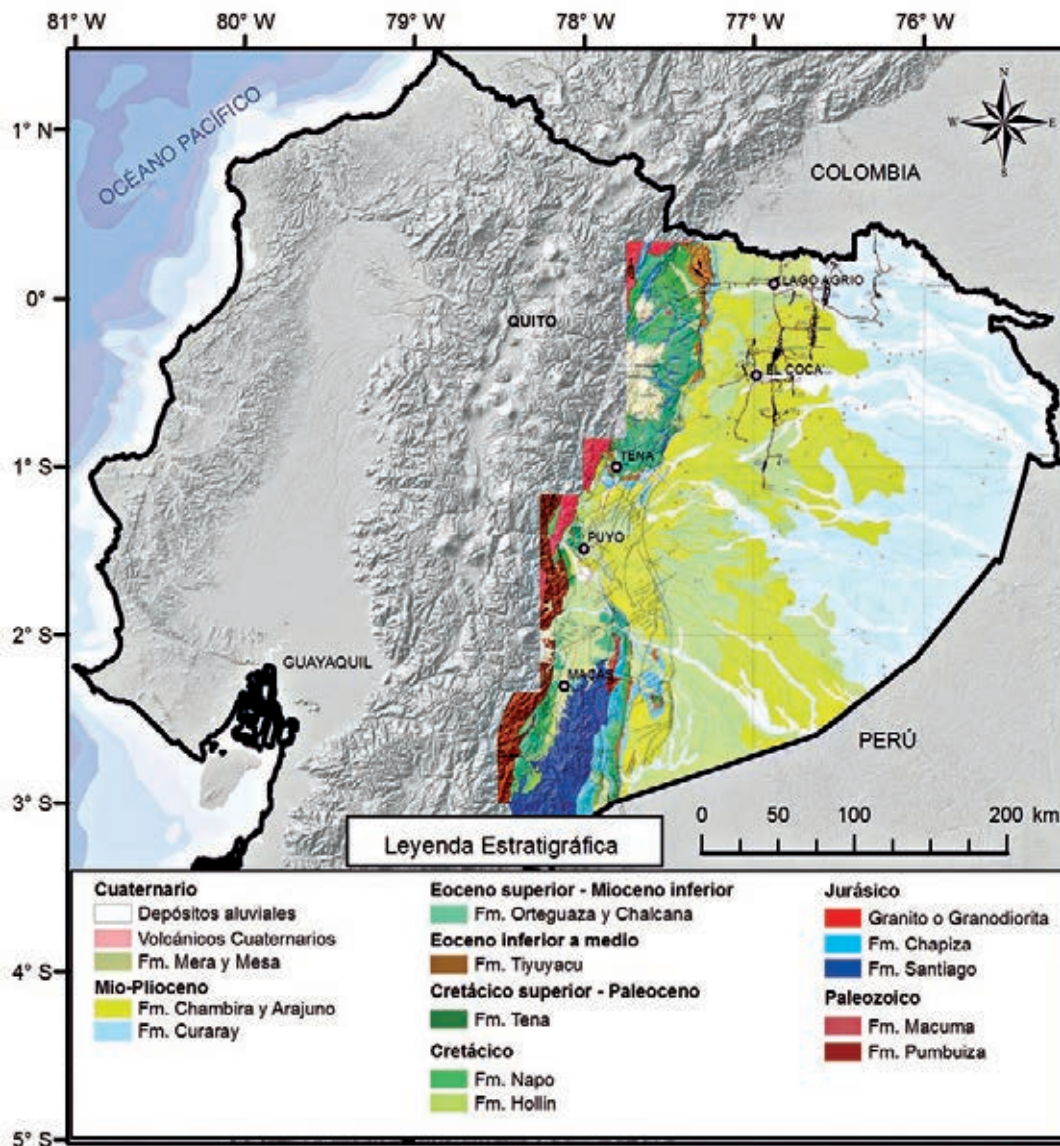


Figura 4.1. Mapa geológico de la cuenca Oriente: provincias de Morona Santiago, Napo, Pastaza y Sucumbios. Adaptado de IRD, *et al.* (2001).

Los suelos de la parte suroccidental de la región Amazónica se caracterizan por provenir principalmente de materiales parentales metamórficos, con intrusiones graníticas y algunos afloramientos sedimentarios, limitados por líneas de fallas tectónicas. La cordillera del Cutucú se caracteriza por poseer un modelo anticlinal con cimas de crestas y barras asimétricas de materiales del Jurásico. Los materiales de chevrones corresponden a materiales Cretácicos y del Terciario. La vegetación predominante está constituida por bosques, pastizales y pequeñas chacras de asentamientos indígenas (PRONAREG y ORSTOM, 1983b; Letamendi, *et al.*, 2007).

De igual manera, en la parte sur se puede apreciar un relieve montañoso muy accidentado por la presencia de cuevas o mesas de areniscas duras, con escasa extensión de valles. Las lutitas dan lugar a relieves poco estructurados. La vegetación de esta zona, en su mayoría, se compone de bosques y pastizales (PRONAREG y ORSTOM, 1983a).

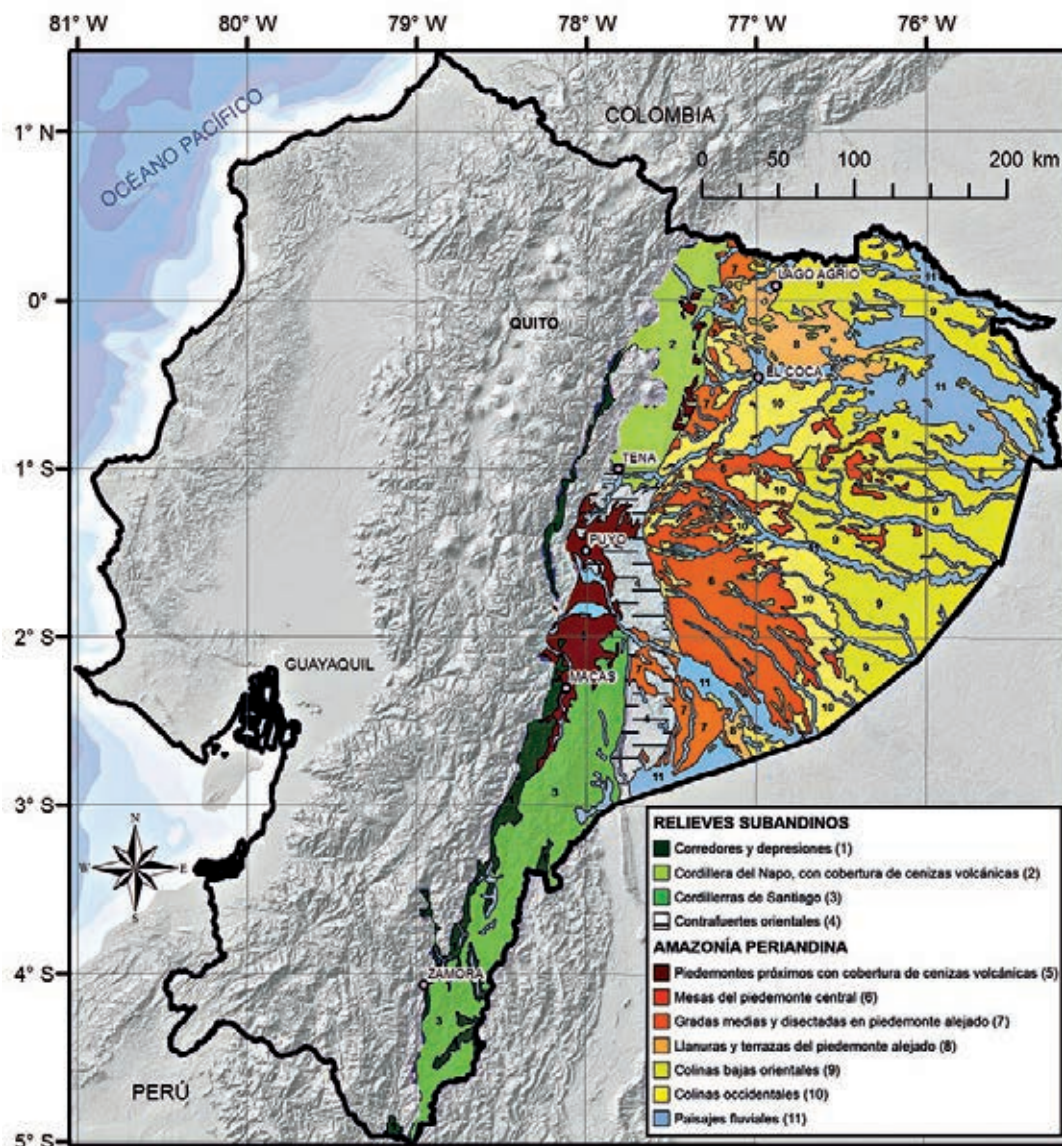


Figura 4.2. Ubicación de los paisajes de la Amazonía con respecto al Ecuador continental. Adaptado de Sourdat y Winckell (1997).

4.1.2. Clima

El clima de la región Amazónica es homogéneo, condición que permite el crecimiento exuberante de la vegetación propia de esta región. El clima se caracteriza por tener dos gradientes pluviométricas distribuidas de la siguiente forma (Sourdat y Winckell, 1997):

4.1.2.1. Gradiente pluviométrica de este a oeste

Los datos de las estaciones pluviométricas de la región Amazónica demuestran la dirección en la que se desarrolla esta gradiente pluviométrica. La estación Tiputini, ubicada en el sector más oriental de la Amazonia ecuatoriana, registra precipitaciones medias anuales de 2 500 mm; la estación Limoncocha, en el centro de la región, registra 3 245 mm; y la estación del Tena, al pie de la vertiente andina oriental, registra 3 484 mm.

4.1.2.2. Gradiente pluviométrica de norte a sur

Sitios con altitudes similares registran una precipitación media anual que paulatinamente se reduce de norte a sur. En Cotundo, la precipitación alcanza valores de 4 590 mm y en el Puyo de 4 410 mm; siguiendo hacia el sur, en Macas, se registra una pluviosidad de 2 550 mm y en Méndez 2 110 mm. En el extremo sur, en San Francisco y Cumbaratzá, se registran precipitaciones de 1 910 mm.

A pesar de que las máximas precipitaciones se registran entre marzo a julio y las mínimas entre julio y febrero, las variaciones mensuales de precipitación no son marcadas. No hay meses secos y en toda la región no existe déficit hídrico.

La temperatura promedio anual de las zonas ubicadas a menos de 300 m s. n. m. es de 25 °C. Las zonas más altas, entre 1 000 y 1 100 m s. n. m., registran una temperatura promedio de 20 °C. Las variaciones de las medias mensuales de temperaturas son inferiores a 2 °C. La humedad relativa varía entre los 85 y 90 % (Sourdat y Winckell, 1997; Espinoza, *et al.*, 2009).

4.2. Suelos de la Amazonía

Los relieves amazónicos se caracterizan por un decrecimiento paulatino de altitud de oeste a este que se asemeja a gradas, generando dos paisajes característicos (Sourdat y Winckell, 1997): a) Relieves Subandinos, que comprenden los corredores, cordilleras y contrafuertes; y b) Amazonía Periandina, con los medios fluviales, colinas periandinas y piedemontes. Estos paisajes corresponden a las áreas adyacentes a la cordillera de los Andes y se extienden hasta el límite político con Perú y Colombia hacia el este y noreste, respectivamente (**Figura 4.2**). En los relieves subandinos, las muy fuertes pendientes van desde 3 000 hasta los 600 m s. n. m., mientras que los relieves periandinos, donde la humedad es permanente, las pendientes se localizan a alturas menores a los 600 m s. n. m. (Custode y Sourdat, 1986).

4.2.1. Relieves subandinos

Son aquellos relieves montañosos o submontañosos ubicados escalonadamente entre 2 500 y 500 m s. n. m., lugar donde se apoya, de norte a sur, la vertiente amazónica de los Andes (**Figura 4.2**). Los paisajes corresponden a los levantamientos de una estructura anticlinal o a los corredores, depresiones y estribaciones adyacentes. Gran parte de estos paisajes están recubiertos por cenizas volcánicas que se han adaptado a las formas ya existentes (Sourdat y Winckell, 1997).

Las formaciones de naturaleza geológica de levantamientos anticlinales, con marcados levantamientos alineados, están ubicadas entre los ríos San Miguel y Anzú (levantamiento Napo) al norte y entre los ríos Pastaza y Chinchipe (levantamiento Cutucú) al sur (DGGM y NERC, 1982). Estas formaciones anticlinales están constituidas, en su mayoría, por sedimentos secundarios y terciarios de origen marino o continental y en ellas se pueden encontrar rocas duras en las mesetas, cuevas y espigas, mientras que las rocas blandas se encuentran en espigas despuntadas o colinas altas asimétricas. En estas formaciones se puede observar la presencia de calizas, redes subterráneas, así como formas subkársticas. Una buena parte de estos relieves están recubiertos por cenizas volcánicas (Sourdat y Winckell, 1997; Letamendi, *et al.*, 2007).

4.2.1.1. Corredores, depresiones y bajas vertientes marginales

Estas unidades se dividen por la presencia de una cobertura de ceniza volcánica al norte y centro de los relieves Subandinos (unidad 1 de la **Figura 4.2**).

4.2.1.1.1. Relieves con cobertura de cenizas volcánicas recientes

En estos relieves se encuentran los corredores de Cosanga y Macas-Méndez que atraviesan de norte a sur las provincias de Napo, Tungurahua y Morona, presentando un paisaje escalonado desde los 2 000 a 500 m s. n. m. que recibe precipitaciones de alrededor de 2 500 mm. Además, por estar recubiertos por cenizas volcánicas, en estas áreas se formaron suelos clasificados como Andisoles hidratados. Los suelos son una mezcla de cenizas y coluviones arcillosos sobre flysch y calizas (rocas de origen sedimentario) (**Figura 4.3**) (Sourdat y Winckell, 1997).



Figura 4.3. Panorámica del Corredor Cosanga Méndez con cobertura de cenizas volcánicas recientes (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016a).

El perfil modal de los suelos de los corredores, depresiones y vertientes bajas marginales con cobertura de cenizas volcánicas (localidades de Baeza y El Chaco al norte y localidades de Macas y Sucúa al centro) corresponde al suelo clasificado como Hydric Hapludands (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 4.4** y **Cuadro 4.1**). Estos suelos se caracterizan por ser moderadamente profundos (~ 1.4 m) y presentar una fuerte reacción al fluoruro de sodio (NaF).



Figura 4.4. Perfil del suelo clasificado como Hydric Hapludands (izquierda) ubicado en Baeza, Quijos, Napo, sobre el cual se cultivan pastos (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016f).

Cuadro 4.1. Características del perfil de suelo clasificado como Hydric Hapludands (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016f).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-25	Color en húmedo: pardo oscuro (7.5YR 3/2); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; densidad aparente: de 0.49 g cm ⁻³ ; media reacción al NaF; pH: 6.5; materia orgánica: 9.9 %; CIC: 10.2 cmol kg ⁻¹ ; saturación bases: 72 %; capacidad de campo: 110 %; punto de marchitez permanente: 80 %.
Bw1	25-65	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura: franco arcillo arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.6; materia orgánica: 3.5 %; CIC: 6 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 70 %.
Bw2	65-100	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10Y 4/4); textura: arcillo limosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.0.
Bw3	100-140	Color en húmedo: pardo (10YR 5/3); textura: arcillo limosa; estructura: bloques subangulares; media reacción al NaF; pH: 6.0.

Siguiendo hacia el sur del corredor se encuentran suelos formados sobre depósitos de cantos rodados de origen volcánico, clasificados como Oxic Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2006). Estos suelos tienen colores pardos, baja fertilidad y concentraciones altas de aluminio intercambiable (Al³⁺) (MIDENA, *et al.*, 2013a).

4.2.1.1.2. Relieves sin cobertura de cenizas

El corredor Limón-Gualaquiza se encuentra entre la cordillera de los Andes y las cordilleras Cutucú y Cóndor, correspondientes al grupo Limón (**Figura 4.5**) que se caracteriza por poseer una diversidad de formas y paisajes y presentar suelos amarillos. El grupo Limón contiene tres diferentes formaciones: a) Formación con crestas aisladas donde predominan los suelos ferralíticos más o menos húmidos como los de la depresión de Zumba; b) Crestas periféricas metamórficas, depósitos sedimentarios internos, partes bajas de las vertientes y los flancos coluviales de los valles del sur que tienen suelos ferralíticos, a veces rejuvenecidos y pedregosos, ubicados sobre coluviones; y c) Vertientes fuertemente disectadas con suelos ferralíticos y pseudo-ferralíticos rejuvenecidos por coluviación, desarrollados sobre flysch y rocas calcáreas, neutros y saturados (PRONAREG y ORSTOM, 1983b).



Figura 4.5. Panorámica del corredor Limón-Gualaquiza sin cobertura de cenizas volcánicas (foto de Carlos Montúfar).

Los suelos más representativos de esta zona están clasificados como Lithic Udorthents y Oxic Dystrudepts (**Figuras 4.6 y 4.7 y Cuadros 4.2 y 4.3**) (Soil Survey Staff, 2006). En general, estos suelos presentan una morfología con una secuencia de horizontes tipo Ap/Bw/C. Los horizontes superficiales tienen colores negros, mientras que a profundidad los colores son amarillos y hasta rojizos. Las texturas son franco arcillosas en la superficie y arcillo limosas en el horizonte de cambio subyacente (Bw). Los horizontes A y B exhiben estructura de tipo bloques subangulares a angulares. Químicamente, son suelos de pH ácido, con una saturación de bases < 50 % (MIDENA, *et al.*, 2013a). Los suelos Lithic Udorthents son poco profundos, ya que presentan un contacto lítico a los 50 cm.



Figura 4.6. Perfil de suelo clasificado como Lithic Udorthents (izquierda) ubicado en Cuyataza, Sucúa, Morona Santiago, sobre un relieve montañoso (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013b).

Cuadro 4.2. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Lithic Udorthents (MIDENA, *et al.*, 2013b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-10	Color en húmedo: pardo oscuro (7.5YR 3/2); textura: franco arenosa; estructura: granular a bloques subangulares, con fragmentos de tipo piedra; pH: 4.8; materia orgánica: 5.3 %; CIC: 16 cmol kg ⁻¹ ; saturación bases: 43 %.
R	10+	Roca.

**Figura 4.7.** Perfil del suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (izquierda) ubicado sobre los restos de una superficie estructural (derecha), El Pangui, Zamora Chinchipe (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016d).**Cuadro 4.3.** Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016d).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo: pardo (10YR 3/4); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 4.3; materia orgánica: 6.8 %; CIC: 10.5 cmol kg ⁻¹ ; saturación bases: 12 %.
Bw1	20-42	Color en húmedo: pardo grisáceo oscuro (10YR 4/3); textura: arcilla pesada; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de grava gruesa; pH: 5.5; materia orgánica: 3.2 %; CIC: 10.8 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 7 %.
Bw2	42-62	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10Y 4/6); textura: arcilla pesada; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de piedras; pH: 5.9; materia orgánica: 1.9 %.
BC	62-135	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 5/8); textura: arcillo limosa; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de piedras; pH: 5.0.

4.2.1.2. Cordilleras subandinas

Entre la cordillera de los Andes y la llanura Amazónica se eleva la tercera cordillera o región subandina. Los relieves más evidentes son el domo del Napo al norte y la Sierra del Cutucú al sur. Estas estructuras están separadas por una depresión situada entre los valles del alto Napo y del alto Pastaza. En el sur,

la cordillera del Cóndor se prolonga e ingresa en territorio peruano (unidades 2 y 3 de la **Figura 4.2**) (Bristow y Hoffstetter, 1977).

4.2.1.2.1. Cordillera del Napo con cobertura de cenizas volcánicas

Estos paisajes pertenecen al levantamiento de la estructura Napo formado por sedimentos Cretácicos, en su mayoría marinos (unidad 2 de la **Figura 4.2**). Esta unidad se halla cubierta por cenizas volcánicas. Dentro de estos paisajes se encuentran geoformas de composición areniscosa y arcillosa como relieves colinados, superficies inclinadas u horizontales, cornisas y vertientes de mesa, frentes y vertientes de cuevas o chevrones y superficies y abruptos de cono de deyección o esparcimiento. También se encuentran ondulaciones suaves y rebajadas sobre caliza, con modelado subkárstico como lapiaz, dolinas y grutas (**Figura 4.8**) (Sourdat y Winckell, 1997).



Figura 4.8. Paisajes de la cordillera del Napo con cobertura de cenizas volcánicas (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016c).

En estos paisajes, las cenizas provenientes de los volcanes Sumaco y Reventador han cubierto todas las formas preexistentes con capas continuas de varios metros de espesor. Las condiciones de edafogénesis de estas cenizas son similares para todos estos paisajes, así, las temperaturas medias anuales varían de 17 a 24 °C, según la altura; las precipitaciones se sitúan entre los 4 000 y 7 000 mm y la nubosidad es particularmente fuerte. Estas condiciones climáticas explican la meteorización íntegra del manto de cenizas, independientemente de su edad o su profundidad (Sourdat y Winckell, 1997).

En esta zona predomina el bosque tropical denso, el cual, en forma excepcional, se adapta a la altura o a los suelos muy poco profundos desarrollados en geoformas accidentadas. En zonas pantanosas esta vegetación cede el paso a formaciones abiertas con palmeras. La vegetación mantiene sobre el suelo capas apreciables de hojarasca que desarrollan horizontes superficiales humíferos muy densos, sobre todo en altura (Sourdat y Winckell, 1997). En esta zona existe una transformación parcial del bosque a cultivos y pastos (**Figura 4.9**).



Figura 4.9. Paisajes de la cordillera del Napo con vegetación fuertemente perturbada.

Los suelos desarrollados sobre estos paisajes son Andisoles hidratados, los mismos que se caracterizan por el predominio de arcillas amorfas que, junto con la materia orgánica, forman complejos órgano-minerales estables, con una tasa de saturación de bases $< 50\%$, una capacidad de retención de agua a $pF3 > 100\%$ y una densidad aparente muy baja (0.2 a 0.4 g cm^{-3}) (Custode y Sourdat, 1986; Sourdat y Winckell, 1997).

El perfil modal de esta zona, de tipo A/Bw, pertenece a un suelo clasificado como Acrudoxic Hapludands, cuya característica es el bajo contenido de bases extraíbles ($< 2 \text{ cmol kg}^{-1}$) (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 4.10** y **Cuadro 4.4**). La reacción al NaF es muy fuerte en todo el perfil, con excepción del nivel blanco (rico en halloysita) y el contenido de materia orgánica en la superficie y a profundidad es alto ($> 10\%$) (Custode y Sourdat, 1986; Zebrowski y Sourdat, 1997).



Figura 4.10. Perfil del suelo clasificado como Acrudoxic Hapludands (izquierda) en Cascales, Sucumbíos (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016e), ubicado en un paisaje característico de la cordillera del Napo (derecha).

Cuadro 4.4. Descripción de las características del perfil de suelo clasificado como Acrudoxic Hapludands (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016e).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-20	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura: franco arcillosa; estructura: granular a bloques subangulares; densidad aparente: de 0.31 g cm ⁻³ ; fuerte reacción al NaF; pH: 6.1; materia orgánica: 9.4 %; CIC: 6.6 cmol kg ⁻¹ ; saturación bases: 11 %.
Bw1	20-41	Color en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.4; materia orgánica: 6.6 %; CIC: 4.5 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 12 %.
Bw2	41-85	Color en húmedo: pardo (10Y 3/4); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; media reacción al NaF; pH: 6.2; materia orgánica: 3.0 %; CIC: 4.8 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 13 %.
Bw3	85-140	Color principal en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) y color secundario en húmedo: pardo fuerte (7.5YR 5/8); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; media reacción al NaF; pH: 6.3; materia orgánica: 1.7 %; CIC: 5.1 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 10 %.

4.2.1.2.2. Cordillera del Santiago sin cobertura de cenizas

La cordillera del Santiago es más voluminosa y accidentada que la cordillera del Napo. En esta estructura se originan las cordilleras del Cutucú y del Cóndor que en conjunto forman una tercera cordillera situada paralelamente a las dos principales cordilleras de los Andes (unidad 3 de la **Figura 4.2**). En esta unidad predominan los relieves muy accidentados como las vertientes y frentes de chevrón (**Figura 4.11**) y los relieves disectados, como las vertientes rectilíneas y heterogéneas con fuerte disección (localmente macizos con restos de formas estructurales), ambos asentados sobre calizas y areniscas. Existen también superficies monoclinales residuales más o menos disectadas como las superficies inclinadas sobre rocas calcáreas (PRONAREG y ORSTOM, 1983a; Sourdats y Winckell, 1997).

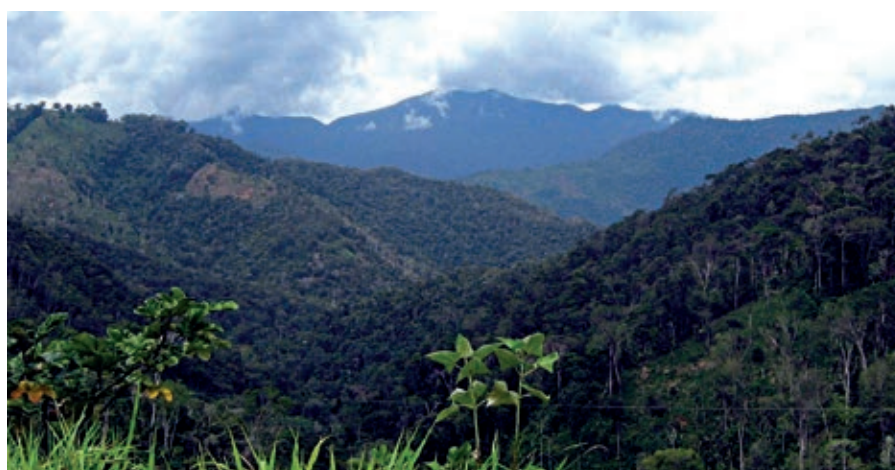


Figura 4.11. Paisaje de la cordillera del Cutucú sin cobertura de cenizas volcánicas (foto de Carlos Montúfar).

La cordillera del Cóndor es una extensión oriental de la cadena andina principal que se extiende alrededor de 150 km de norte a sur, formando parte de la frontera internacional entre Ecuador y Perú (**Figura 4.12**). El punto de mayor altitud llega a alrededor de 2 500 m s. n. m. El paisaje dominante se compone de relieves accidentados, principalmente sobre granitos y modelados estructurales sobre areniscas, como las cornisas y vertientes de mesa. Asimismo, existen superficies de cono de esparcimiento disectados y relieves colinados (Sourdat y Winckell, 1997). Estos relieves están asociados litológicamente a rocas del período Cretácico (Bristow y Hoffstetter, 1977).



Figura 4.12. Paisaje de la cordillera del Cóndor sin cobertura de cenizas volcánicas.

En ambas cordilleras no hay una cobertura generalizada de cenizas, pero algunas áreas localizadas en las vertientes que rodean al volcán Sangay presentan cenizas que se supone provienen su actividad. Las altitudes de las cordilleras varían entre 2 500 y 500 m s. n. m., por lo tanto, las temperaturas medias anuales se ubican entre 13 y 21 °C. Las precipitaciones son de alrededor de 2 000 mm al año (Sourdat y Winckell, 1997).

Estos paisajes se encuentran cubiertos por matorrales, bosques pluviales o bosques húmedos tropicales, los cuales, lamentablemente, tienden a reducirse por las prácticas de corte, quema, siembra de cultivos anuales (maíz) y por la ampliación del área de pastos naturales (**Figura 4.13**). En los últimos años, la expansión del área agrícola, principalmente de las áreas dedicadas a pastos, ha sido uno de los principales agentes de deterioro de los bosques Amazónicos (Mena, *et al.*, 2006; Brondízio, *et al.*, 2009).

La cobertura edafológica de esta unidad agrupa los siguientes tipos de suelos: a) Suelos poco evolucionados, b) Suelos ferralíticos y pseudoferralíticos y c) Suelos podzólicos retocados.



Figura 4.13. Paisajes de la cordillera del Santiago con vegetación perturbada (fotos de Carlos Montúfar).

Suelos poco evolucionados

Estos suelos son aquellos en los cuales los procesos erosivos son mayores que los procesos pedogenéticos, por esta razón, los perfiles son delgados, muchas veces < 10 cm, generalmente con presencia de roca a 50 cm de profundidad formando un perfil tipo A/C/R o A/R. El color del horizonte superficial es pardo amarillento oscuro a pardo amarillento, con textura franco arcillosa y arcillosa (Custode y Sourdat, 1986). Estos suelos se clasifican como Typic Udorthents y Lithic Udorthents (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 4.14** y **Cuadro 4.5**).



Figura 4.14. Perfil del suelo poco evolucionado clasificado como Lithic Udorthents (izquierda), sobre pendientes muy pronunciadas (derecha) (Haro y Montúfar, 2014).

Cuadro 4.5. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Lithic Udorthents (Haro y Montúfar, 2014).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-15	Color pardo en húmedo: muy oscuro (10YR 2/2); textura: franco arcillo arenosa; estructura: grumosa, con fragmentos de grava; pH: 4.8; materia orgánica: 8.5 %; CIC: 27 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 31 %.
C	15-45	Color en húmedo: gris (10YR 5/1); textura: arcillo arenosa; estructura: masiva, con fragmentos de piedras.
R	45+	Roca.

Suelos ferralíticos y pseudoferralíticos

Estos suelos tienen colores vivos, sobre todo en el horizonte B, son profundos y están sobre rocas muy alteradas que han generado minerales arcillosos tipo 1:1 (caolinita y halloysita). Además, son suelos en los que están siempre presentes óxidos de hierro (goetita y hematita) y en muchos casos óxidos de aluminio (gibbsite). La saturación de bases es < 50 % (desaturados) debido a la intensidad de las precipitaciones (> 2 500 mm) que promueve regímenes de humedad údicos y perúdicos en el suelo (Zebrowski y Sourdat, 1997).

Los perfiles de estos suelos son de tipo A/B/C, con horizontes más o menos diferenciados, desarrollados, transformados o rejuvenecidos. Bajo la cobertura forestal original, los 20 primeros cm del perfil son ricos en materia orgánica (> 4 %). Las texturas dependen del material original y pueden presentar residuos cuarzosos (hasta 90 %). Los horizontes superficiales son frecuentemente pobres en arcilla, sin evidencias de acumulación en el horizonte B y sin formación de horizontes argílicos (Zebrowski y Sourdat, 1997).

Tomando en cuenta las condiciones climáticas y topográficas de la zona, todos estos suelos deberían clasificarse como ferralíticos con una relación Si:Al < 2, sin embargo, existe una importante proporción de suelos con arcillas 2:1, cuya relación Si:Al sigue siendo > 2. Además, en estos suelos, salvo en el caso de rejuvenecimiento por erosión o coluvionación, la lixiviación de bases es alta, la cantidad de cationes intercambiables es generalmente < 4 cmol kg⁻¹ y la tasa de saturación de bases es generalmente < 10 % y en ciertos casos puede reducirse hasta saturaciones < 1 %. Las cantidades de hierro (Fe) libre son elevadas y la relación Fe libre:Fe total está entre 0.5 y 0.9, los contenidos de Al³⁺ son excepcionalmente altos y el pH siempre es < 5.5 pudiendo descender hasta valores < 4.

Los suelos desaturados muy ácidos y más ricos en Al³⁺ son los que contienen la mayor cantidad de minerales 2:1. Estos suelos se denominan pseudoferralíticos porque resulta difícil identificar sus características y delimitar su extensión en relación con los verdaderos suelos ferralíticos (Zebrowski y Sourdat, 1997).

En la Amazonía existen suelos cuyas características físico-químicas son similares a los Oxisoles, sin embargo, estos suelos no tienen un horizonte óxico, condición necesaria para ser clasificados en este orden (CIAT, 1983) y, por esta razón, se clasifican como Oxyc Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 4.15** y **Cuadro 4.6**) que se caracterizan por una pobre fertilidad y altos contenidos de Al³⁺.



Figura 4.15. Perfil del suelo clasificado como Oxyc Dystrudepts (izquierda) ubicado en Gualaquiza, Morona Santiago, sobre el cual se cultivan pastos (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015b).

Cuadro 4.6. Descripción de las características del perfil de suelo clasificado como Oxyc Dystrudepts (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-35	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (7YR 4/4); textura: arcillosa (44 % de arcilla); estructura: bloques subangulares; pH: 5; Al ³⁺ : 3.9 cmol kg ⁻¹ ; materia orgánica: 2.8 %; CIC: 6 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 18 %.
A	35-80	Color en húmedo: pardo fuerte (7.5YR 5/4); textura: arcillosa (49 % de arcilla); estructura: bloques subangulares, con fragmentos de grava gruesa; pH: 4.9; Al ³⁺ : 6.4 cmol kg ⁻¹ ; materia orgánica: 1.8 %; CIC: 6.8 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 10 %.
Bw	80-140	Color en húmedo: pardo fuerte (7.5YR 5/3); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de grava gruesa.

Por otro lado, los suelos pseudoferralíticos se clasifican como Oxic o Typic Dystrudepts (**Figura 4.16** y **Cuadro 4.7**) y se caracterizan por tener un incipiente desarrollo pedogenético, dando lugar a la formación de horizontes alterados denominados cámbicos (Bw). En general, los horizontes de estos suelos presentan una CIC < 24 cmol kg⁻¹ en el caso de los Oxic Dystrudepts y > 24 cmol kg⁻¹ en el caso de los Typic Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2006). Estos suelos presentan un perfil del tipo A/B/C.



Figura 4.16. Perfil del suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (izquierda) ubicado en Tiwintza, Morona Santiago, sobre una vertiente con pendiente fuerte (40 a 70 %) (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015a).

Cuadro 4.7. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015a).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-22	Color en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3), con moteado pardo fuerte (7.5YR 4/6); textura: arcillo limosa; estructura: bloques subangulares, con muchos fragmentos de grava gruesa; pH: 5.8; materia orgánica: 4.0 %; CIC: 6.9 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 14 %.
Bw	22-40	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 5/6); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares, con muchos fragmentos de grava gruesa; pH: 6.0; materia orgánica: 0.9 %; CIC: 8.4 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 11 %.
Cr	40-100	Fragmentos gruesos de cantos e intemperización fuerte.

4.2.1.3. Contrafuertes subandinos

Esta zona está localizada en un área de transición entre las cordilleras subandinas y las colinas periandinas (unidad 4 de la **Figura 4.1**), con altitudes cercanas a los 1 000 m s. n. m. al norte, descendiendo hasta aproximadamente 500 m s. n. m. hacia el sur. La temperatura media anual varía entre 21 y 24 °C y la precipitación se aproxima a los 3 000 mm (Sourdat y Winckell, 1997).

El fuerte tectonismo y plegamiento durante el levantamiento andino promovió la presencia de colinas de piedemonte, conformadas por relieves fuertemente disectados, irregulares y angulosos, cuevas disectadas, chevrone y vertientes irregulares, con pendientes escarpadas y cóncavas de material sedimentario arenoso y arcilloso rojizo. Estos materiales han aflorado a causa de procesos erosivos antiguos y se diferencian de los piedemontes de materiales de sedimentos gruesos del norte y de las areniscas tobáceas y arcillas de abanicos de piedemonte del sur (**Figura 4.17**) (Sourdat y Winckell, 1997).



Figura 4.17. Panorámica de los relieves disectados, cubiertos por vegetación natural, ubicados en la provincia de Pastaza.

Los suelos de esta unidad son los característicos de zonas tropicales de gran pluviosidad. Predominan los colores rojos (5YR 5/6 a 2.5YR 4/8) y amarillos (2.5Y 5/2 a 5Y 6/6) de acuerdo con la hidratación del Fe y, por lo general, son franco arcillosos de buena aireación y buen drenaje (Zebrowski y Sourdat, 1997). Debido a los altos volúmenes de precipitación, los porcentajes de saturación de bases son bajos (< 35 %) y la acidez del medio limita la actividad microbiana (Mejía, 1997). Estos suelos de baja fertilidad natural y contenidos tóxicos de Al^{3+} se clasifican como Typic u Oxic Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2006) (**Figuras 4.18, 4.19 y Cuadros 4.8, 4.9**).



Figura 4.18. Perfil de suelo clasificado como Typic Dystrudepts (izquierda) ubicado en el Arajuno, Pastaza, sobre una vertiente heterogénea (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016g).

Cuadro 4.8. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Typic Dystrudepts (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016g).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-20	Color principal en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) y color secundario en húmedo: rojo amarillento (5YR 5/8); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 6.8; materia orgánica: 1.5 %; CIC: 15.6 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 37 %.
Bw	20-45	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 5/8); textura arcillosa; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de grava media; pH: 6.0; materia orgánica: 0.7 %; CIC: 16.5 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 35 %.
C	45-85	Color principal en húmedo: amarillento parduzco (10YR 6/6) y color secundario en húmedo: gris azulado (GLEYS 2 6/10B); textura arcillosa; estructura: masiva, con fragmentos de grava media; pH: 5.5.
Cr	85-110	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); estructura: fragmentos de piedras.

**Figura 4.19.** Perfil de suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (izquierda) ubicado en Simón Bolívar, Pastaza, Pastaza, sobre una vertiente rectilínea (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016g).

Cuadro 4.9. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016g).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-25	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de piedras; pH: 5.9; materia orgánica: 2.9 %; CIC: 19.5 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 41 %.
Bw1	25-45	Color en húmedo: pardo rojizo oscuro (5YR 3/2); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 5.9; materia orgánica: 5.7 %; CIC: 16.8 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 56 %.
Bw2	45-70	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de piedras; pH: 6.2; materia orgánica: 2.5 %.
Bw3	70-95	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 5/4); textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de piedras; pH: 5.0.
C	95-150	Color en húmedo: amarillo pálido (5Y 7/4); textura: arcillosa; estructura: masiva; pH: 5.

En esta área también se pueden encontrar suelos clasificados como Lithic Udorthents que tienen una delgada capa de suelo y material orgánico sobre la roca. Estos suelos se desarrollaron en pendientes pronunciadas y que al talarse la cubierta vegetal pierden el material órgano-mineral de la superficie (horizontes O y A), lo que favorece el afloramiento del material parental. Por esta razón, no se aconseja el uso de estos suelos para actividades agrícolas o ganaderas (Cañadas, 1983; Añazco, *et al.*, 2010).

4.2.2. Suelos de la Amazonía Periandina

4.2.2.1. Piedemontes

4.2.2.1.1. Piedemontes próximos con cobertura de cenizas volcánicas

Esta unidad corresponde a los relieves más altos de los Piedemontes Periandinos y representan un amplio complejo de glaciares disectados (**Figura 4.20**) que se extienden sobre las zonas del Puyo, Palora y Macas, en altitudes que se encuentran entre los 1 100 y los 900 m s. n. m. (unidad 5 de la **Figura 4.1**). Estos conos se formaron por el aporte aluvial de los ríos Pastaza, Palora y Upano y, adicionalmente, por el gran aporte de cenizas volcánicas provenientes de los volcanes Tungurahua y Sangay. Las condiciones climáticas prevalentes, con temperaturas medias anuales de alrededor de 20 °C y con precipitaciones que se aproximan a los 5 000 mm anuales, son factores formadores que han promovido el desarrollo de Andisoles hidratados clasificados como Hydrudands (Soil Survey Staff, 2006) que se caracterizan por su alta retención de humedad (> 100 %). Dado el régimen de humedad perúdic de este tipo de suelos, la alteración de los materiales primarios es casi completa, lo que da como resultado una mezcla de alófana, materia orgánica y sesquióxidos (Sourdat y Winckell, 1997; Pacheco, 2009).



Figura 4.20. Panorámica de los grandes glaciares de esparcimientos disectados de los piedemontes con cobertura de cenizas volcánicas ubicados en Fátima, Pastaza, Pastaza (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016b).

Morfológicamente, el perfil modal de este tipo de suelos presenta una distribución de horizontes Ap/AB/Bw. En la **Figura 4.21** y el **Cuadro 4.10** se visualiza la formación de un horizonte cámbico (Bw), lo que indica el poco desarrollo pedogenético característico de los Andisoles.



Figura 4.21. Perfil del suelo clasificado como Hydric Hapludands ubicado sobre un abrupto de cono de esparcimiento en Tarqui, Pastaza, Pastaza, caracterizado por su alta retención de humedad (> 100 %) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016g).

Cuadro 4.10. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Hydric Hapludands (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016g).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-20	Color en húmedo: negro (10YR 2/1); textura: franco arcillo arenosa; estructura: granular; densidad aparente: 0.18 g cm ⁻³ ; fuerte reacción al NaF; pH: 6.0; materia orgánica: 11.8 %; CIC: 3.9 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 34 %.
Bh	20-50	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 3/4); textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6.2; materia orgánica: 5.2 %; CIC: 3.6 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 24 %.
Bw1	50-75	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: franco arenosa; estructura prismática a bloques; media reacción al NaF; pH: 6.2; materia orgánica: 3.4 %; CIC: 5.4 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 14 %.
Bw2	75-110	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/6); textura: franco arenosa; estructura: prismática a bloques; media reacción al NaF; pH: 6.5.
Bw3	110-160	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 5/6); textura: franco arenosa; estructura: prismática a bloques; media reacción al NaF; pH: 6.5.

Por sus condiciones físicas estos son suelos profundos y de buena estructura caracterizados por tener una densidad aparente < 0.8 g cm⁻³. Las condiciones de drenaje son buenas, es decir, la eliminación del agua dentro del perfil es fácil, aunque no rápida. Hacia las zonas de pendientes planas el drenaje es más lento, debido al incremento de arcilla a profundidad, lo que dificulta el movimiento del agua al interior del suelo.

Estos suelos tienen pH ácido (~ 5.9), niveles altos de materia orgánica (3.2 %), CIC entre 5 a 10 cmol kg⁻¹ y una saturación de bases < al 35 %. Debido a su baja CIC no son capaces de retener los cationes esenciales para nutrición de la planta (Mejía, 1997).

4.2.2.1.2. Piedemontes de materiales detríticos sin cenizas

Estos Piedemontes corresponden a glaciares o conos de esparcimiento muy amplios, de pendientes generalmente suaves, que se abren desde el oeste hacia el este, entre los grandes cauces de los ríos Napo y Pastaza (unidad 6, 7 y 8 de la **Figura 4.1**). El material parental originario proviene de la formación Mesa, que corresponde a una serie plio-pleistocena de terrazas disectadas, constituidas por depósitos clásticos de tamaño mediano y grueso, derivados de procesos erosivos de la Sierra que, adicionalmente, se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos cuaternarios (Sourdat y Winckell, 1997). Este material geológico ha formado suelos clasificados como Inceptisoles que presentan un incipiente desarrollo pedogenético que si bien se formaron a partir de arcillas amarillas, plásticas, ricas en gravas de cuarzo, no presentan evidencia de procesos de iluviación que reflejen una alta meteorización de los suelos.

Las altitudes de estas zonas, que se enmarcan entre los 900 y 300 m s. n. m, están asociadas a temperaturas > 22 °C en años normales y precipitaciones que alcanzan los 4 500 mm anuales (Sourdat y Winckell, 1997). Estas condiciones climáticas, especialmente de precipitación, han dado origen a suelos distróficos (saturación de bases < 50 %) que corresponden al gran grupo de los Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2006). La cobertura natural predominante del paisaje corresponde a grandes áreas dedicadas a pastizales para ganadería extensiva de doble propósito (**Figura 4.22**). Asimismo, existen extensas áreas dedicadas a la siembra de palma aceitera, palmito y cacao que han sido aprovechadas para este propósito por las condiciones topográficas favorables (INEC, 2019).



Figura 4.22. Paisaje de los grandes glaciares de esparcimiento ligeramente ondulados aprovechados con pastizales.

La mayoría de los perfiles de suelo descritos en estas áreas presentan una secuencia de horizontes del tipo Ap/Bw1/Bw2 (**Figura 4.23** y **Cuadro 4.11**). Son suelos profundos, de drenaje moderado, es decir, el agua circula con cierta dificultad lo que provoca que en las zonas planas exista encharcamiento por períodos cortos promovido por el contenido de arcilla al interior del perfil.



Figura 4.23. Perfil del suelo clasificado como Humic Dystrudepts ubicado en Mera, Pastaza (izquierda), sobre una vertiente rectilínea con pendiente del ~50 %, (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016g).

Cuadro 4.11. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Humic Dystrudepts (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016g).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-25	Color en húmedo: gris muy oscuro (10YR 3/1); textura: franco arenosa; estructura: grumosa; pH: 5.9; materia orgánica: 7.0 %; CIC: 13.2 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 18 %.
Bw1	25-59	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: franco arcillo arenosa; estructura: bloques angulares y subangulares, con fragmentos de grava gruesa; pH: 6.4; materia orgánica: 2.0 %; CIC: 5.1 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 18 %.
Bw2	59-110	Color en húmedo: pardo amarillento (10YR 5/4); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de grava gruesa; pH: 6.5.
Bw3	110-135	Color en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); textura: arcillosa; estructura: bloques subangulares, con fragmentos de piedras; pH: 6.5.

Además, son suelos con bajos porcentajes de saturación de bases (< 35 %), baja CIC (5 a 10 cmol kg⁻¹), contenidos medios a bajos de materia orgánica y pH que fluctúa entre medianamente ácido a ácido, condición que podría promover la presencia de problemas de toxicidad de Al³⁺. Estos suelos, por haberse desarrollado en zonas muy húmedas, presentan elevada lixiviación de Si y otros cationes como K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ y Na⁺ lo que hace que sean suelos de baja fertilidad (Mejía, 1997).

4.2.2.2. Colinas periandinas sobre areniscas, conglomerados y arcillas

Los paisajes de la cuenca amazónica están constituidos principalmente por macizos colinarios ubicados entre la ruptura de la pendiente de la parte andina o subandina y la frontera con el Perú, a altitudes entre 600 y 250 m s. n. m. (unidades 9 y 10 de la **Figura 4.1**). En estas colinas, las características de los paisajes de piedemonte que están fuertemente marcadas por el origen granítico, metamórfico o volcánico de los materiales superficiales, son cada vez menos perceptibles, pero nunca ausentes, lo que justifica que se haya dado a este conjunto el nombre de periandino. Todas las formaciones sedimentarias periandinas están sobre el Escudo Guayanés; son casi horizontales y no han sufrido arrugamientos, lo que explica la brusca discontinuidad estructural y ruptura de la pendiente. Las colinas se han cartografiado como afloramientos mio-pliocenos cuando, en realidad, el substrato mio-plioceno está siempre presente, disectado en colinas o erosionado en plataformas. Las temperaturas medias anuales de esta zona son > 23 °C y las precipitaciones van desde los 2 500 hasta los 4 500 mm al pie del reborde andino. Como no existe variación en los parámetros altitudinales y climáticos, la cobertura edafológica se distingue por la calidad del drenaje (Sourdat y Winckell, 1997).

4.2.2.2.1. Colinas bajas orientales

Estas formas de relieve son el paisaje más generalizado que caracteriza a la Amazonía ecuatoriana y se presentan como un conjunto de pequeños relieves con escasos desniveles (10 a 20 m), convexos, con pendientes < 40 %, iguales y nivelados entre sí, razón por la cual se conocen como media naranjas (**Figura 4.24**). También se presentan colinas más altas, que no pasan de 50 m de desnivel relativo, con vertientes más fuertes, asociadas en alineamientos o en macizos dentro de los cuales el nivelamiento no es riguroso. Un tercer paisaje está conformado por un conjunto de colinas con cimas redondeadas, generalmente de aspecto tabulario, limitadas por un pequeño abrupto de contorno. A este último conjunto se le ha dado el nombre de Mar de Colinas Aledañas y se localiza en medio de los interfluvios ubicados en la parte nororiental de la Amazonía ecuatoriana (unidad 9 de la **Figura 4.1**) (Sourdat y Winckell, 1997).

Los cortes de las colinas muestran capas decimétricas de conglomerados con guijarros y arenas al lado norte, mientras que al lado sur son más frecuentes los estratos decimétricos de materiales arcillosos (**Cuadro 4.12**), areniscosos o pelíticos (Sourdat y Winckell, 1997).



Figura 4.24. Perfil de suelo clasificado como Typic Palehumults (izquierda) ubicado Cuyabeno, Sucumbíos, en las colinas en media naranja (derecha), (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015c).

Cuadro 4.12. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Typic Palehumults (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015c).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-10	Color en húmedo: pardo (7.5YR 4/2); textura: arcillosa; estructura: granular; pH: 4.2; materia orgánica: 9.0 %; CIC: 44 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases 2.2 %.
Bt1	10-40	Color en húmedo: pardo (7.5YR 4/4); textura: arcilla pesada; estructura: bloques subangulares; pH: 4.1; materia orgánica: 3.3 %; CIC: 40 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 0.9 %.
Bt2	40-70	Color en húmedo: pardo fuerte (7.5YR 4/6); textura: arcilla pesada; estructura: prismática a bloques; pH: 4.5; materia orgánica: 2.4 %; CIC: 38 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 1.9 %.
Bt3	70-120	Color en húmedo: rojo amarillento (5YR 5/6); textura: arcillosa; estructura: prismática a bloques; pH: 5.0.
Bt4	120-150	Color en húmedo: principal rojo (2.5YR 4/8); textura: arcillosa; estructura: prismática a bloques; pH: 5.0; materia orgánica: 2.1 %.

4.2.2.2.2. Colinas occidentales

El difícil acceso a estos paisajes hace que sean poco explorados, pero la fotointerpretación ha permitido reconocer y delimitar zonas de colinas generalmente más altas que las bajas colinas orientales. Son colinas angulares, de tamaño medio y bajo, localizadas exclusivamente en la parte occidental de la Amazonía ecuatoriana, próxima a los relieves subandinos que tienen pendientes más fuertes (> 40 %) (Unidad 10 de la **Figura 4.1**). Esta zona también agrupa a las vertientes inferiores de las mesas y los relieves periféricos derivados de estructuras tabulares, con pendientes de suaves a fuertes (Sourdat y Winckell, 1997).

La cobertura edafológica de estas colinas periandinas es la más extendida de la Amazonía ecuatoriana y asocia varios tipos de suelos rojos muy ácidos ($\text{pH} < 4.5$) de perfiles tipo A/B/C/R, caracterizados por el predominio de horizontes que han pasado por procesos intensos de lixiviación bases y Si (ferralitización), que generan acumulación de Fe (como óxido férrico). Los horizontes A son similares, pero los horizontes B son muy diferentes de un perfil a otro porque la disección colinada recorta imprevisiblemente el estrato de material original. Estos suelos se caracterizan, además, por el predominio de horizontes alteríticos, cuyo desarrollo sobrepasa la profundidad de los cortes corrientes y nunca deja ver la roca alterada. En esta gran cobertura edafológica se presentan dos tipos generales de suelos (Custode y Sourdats 1986):

- Suelos rojos claros, arcillosos y compactos, horizontes poco diferenciados seguidos a poca profundidad por plintita constituida por montmorillonita, illita, vermiculita y caolinita asociadas a cuarzo y con $< 15\%$ de óxidos. Son suelos desaturados (entre 1 y 20 % de saturación de bases) y con cantidades altas de Al^{3+} tóxico (Figura 4.25 y Cuadro 4.13).
- Los suelos rojos oscuros, más profundos, mejor organizados y drenados, más arcillosos, constituidos por caolinita y poca gibsitita, cuarzo y óxidos. Son desaturados y tienen altas cantidades de Al^{3+} tóxico.

En estos suelos, que tienen un régimen de temperatura isohipertérmico y un régimen de humedad de údico a perúdic, los parámetros como la saturación de bases y el contenido de Al^{3+} indican que son suelos de baja fertilidad. Lo anterior, junto a las limitaciones de relieve, hace que el potencial agropecuario de esta zona sea muy restringido (Custode y Sourdats, 1986).



Figura 4.25. Perfil del suelo clasificado como Plinthic Kandihumults (izquierda) ubicado en la provincia de Orellana, en un relieve colinado bajo (derecha) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015d).

Cuadro 4.13. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Plinthic Kandihumults (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015d).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-15	Color en húmedo: pardo (7.5YR 4/2); textura: arcillosa; estructura: granular; pH: 4.4; materia orgánica: 5.4 %; CIC: 36 cmol kg^{-1} ; saturación de bases 2.1 %.
Bt1	15-65	Color en húmedo: pardo (7.5YR 4/4); textura: arcilla pesada; estructura: prismática a bloques subangulares; pH: 4.8; materia orgánica: 2.0 %; CIC: 37 cmol kg^{-1} ; saturación de bases: 1.0 %.
Bt2	65-110	Color en húmedo: pardo rojizo (5YR 5/4); textura: arcilla pesada; estructura: prismática a bloques; pH: 4.7; materia orgánica: 2.1 %; CIC: 42 cmol kg^{-1} ; saturación de bases: 1.0 %.
Bt3	110-140	Color en húmedo: rojo amarillento (5YR 5/6); textura: arcillosa; estructura: prismática a bloques; pH: 5.0.
Bv	140-150	Color principal en húmedo: gris claro (5YR 7/1) y color secundario en húmedo: rojo (2.5YR 4/8); textura: arcilla pesada; estructura: prismática; pH: 5.0.

4.2.2.3. Medio aluvial

Corresponde a valles aluviales (unidad 11 de la **Figura 4.1**) cuyo desnivel relativo en relación a los ríos es ligeramente más alto, por lo que el nivel freático suele aparecer a pocos centímetros de la superficie. Adicionalmente, las pendientes planas, predominantes de estas geoformas fluviales, hacen que sean zonas muy susceptibles a inundaciones. En las partes bajas de las depresiones periandinas, los valles se ensanchan considerablemente y todo el ambiente fluvial se vuelve bastante amplio (**Figura 4.26**). Solo en cortes muy profundos se puede observar el lecho rocoso conformado principalmente por cantos rodados producto del acarreo de los ríos. El principal material que ha dado origen a la formación de los suelos corresponde a alteritas arcillo-arenosas de colores rojos a grisáceos, con intercalaciones de bancos de grauwas (Sourdat y Winckell, 1997).

Dentro de las áreas fluviales es posible encontrar zonas pantanosas y depresiones inundadas que se distribuyen a lo largo de los cauces de los ríos actuales.



Figura 4.26. Panorámica de un valle fluvial con terrazas indiferenciadas característica del medio aluvial Amazónico.

Los suelos del medio aluvial tienen rasgos de hidromorfismo, en muchos de los perfiles es evidente la presencia del nivel freático, mientras que en los que éste no aparece es evidente la presencia de rasgos redoximórficos como moteados y coloraciones gley. Taxonómicamente están clasificados dentro del gran grupo de los Endoaquepts (Soil Survey Staff, 2006), por su condición de suelos saturados con agua la mayor parte del año.

El perfil representativo de estos suelos (**Figura 4.27** y **Cuadro 4.14**) presenta una distribución de los horizontes tipo Ap/Bg/Cg. El nivel freático aparece a pocos centímetros de profundidad. En algunos perfiles el nivel freático puede ubicarse unos pocos centímetros más abajo y se puede observar el horizonte Cg. El pH es medianamente ácido (5.5), la CIC es $< 10 \text{ cmol kg}^{-1}$ y la saturación de bases $< 35 \%$.

Debido a las malas condiciones de drenaje, estos suelos requerirían de grandes inversiones en obras civiles para la evacuación del exceso de agua y necesitarían cantidades altas de enmiendas orgánicas y minerales para poder utilizarlos en actividades agropecuarias. Estas prácticas no serían rentables y, además, tendrían un alto impacto ambiental (Mejía, 1997). Estos paisajes deben preservarse sin intervención humana para mantener la estabilidad de uno de los ambientes más biodiversos del mundo (Brondízio, *et al.*, 2009).



Figura 4.27. Perfil de un suelo saturado con agua, típico de los valles aluviales amazónicos, ubicado en San Francisco de Borja, Quijos, Napo (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016f).

Cuadro 4.14. Descripción de las características del perfil del suelo clasificado como Thaptic Endoaquands (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016f).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Oap	0-10	Color en húmedo: pardo oscuro (7.5YR 3/2); estructura: sin estructura, con materiales orgánicos en descomposición.
Bg1	10-30	Color principal en húmedo: pardo (7.5YR 4/2) y color secundario en húmedo: gris muy oscuro (2.5Y 3/1); textura: franca; estructura: bloques subangulares; densidad aparente: 0.58 g cm ⁻³ ; fuerte reacción al NaF; pH: 6.6; materia orgánica: 5.4 %; CIC: 4.5 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 44 %.
Bg2	30-40	Color en húmedo: gris claro (2.5Y 7/2); textura: franco arcillo limosa; estructura: bloques; media reacción al NaF; pH: 6.3; materia orgánica: 1.7 %; CIC: 1.8 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 64 %.
Ab	40-70	Color en húmedo: rojo amarillento (10YR 3/2); textura: franco arenosa; estructura: masiva, desmenuzable; media reacción al NaF; pH: 6.3; materia orgánica: 11.6 %; CIC: 5.1 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 42 %.
2Oa	70-135	Color principal en húmedo: pardo gris ceo muy oscuro (10YR 3/2) y color secundario en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); saturado con agua.

4.3. Referencias bibliográficas

- Añazco, M., M. Morales, W. Palacios, E. Vega y A. Cuesta. 2010. Sector forestal ecuatoriano: propuestas para una gestión forestal sostenible. Serie Investigación y Sistematización No. 8. Programa regional ECOBONA. Quito. Ecuador. <http://bit.ly/35DNz3D>
- Bristow, C. y R. Hoffstetter. 1977. Léxico Estratigráfico del Ecuador. Centre National de la Recherche Scientifique. París, Francia.
- Brondízio, E., A. Cak, M. Caldas, C. Mena, R. Bilsborrow, C. Futemma, *et al.* 2009. Small farmers and deforestation in Amazonia. In: M. Keller, M. Bustamante, J. Gash and P. Silva (eds). Amazonia and global change. Geophysical Monograph 186. AGU Books & Monographs. Washington, DC, USA. p. 117-143. <https://doi.org/10.1029/2008GM000737>

- Cañadas, L. 1983. El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. Editores Asociados. Quito, Ecuador.
- CIAT. 1983. Oxisoles y Ultisoles en América Tropical: Distribución, importancia y propiedades físicas. CIAT. Cali, Colombia. <http://bit.ly/34wr1Af>
- Custode, E. y M. Sourdat. 1986. Paisajes y suelos de la Amazonía ecuatoriana: entre la conservación y la explotación. *Cultura-Revista del Banco Central del Ecuador* 8(24): 325-337. <http://bit.ly/2PDhvG3>
- DGGM y NERC. 1982. National geological map of the republic of Ecuador, scale 1: 1 000 000. DGGM-NERC. Quito, Ecuador.
- Espinoza, J., J. Ronchail, J.L. Guyot, G. Cochonneau, F. Naziano, W. Lavado, *et al.* 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology* 29(11): 1574-1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>
- Haro, R. y C. Montúfar, C. 2014. Quito, Ecuador. 2014. Reporte del proyecto hidroeléctrico Río Santiago. Morona Santiago. CELEC. Quito, Ecuador.
- Hoorn, C., J. Guerrero, G.A. Sarmiento and M.A. Lorente. 1995. Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology* 23(3): 237-240. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0237:ATAACF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0237:ATAACF>2.3.CO;2).
- INEC. 2019. Encuesta de superficie y producción agropecuaria. Disponible en <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/estadisticas-productivas>
- IRD, PETROPRODUCCIÓN y IGM. 2001. Mapa geológico de la cuenca Oriente. provincias de Morona Santiago, Napo, Pastaza y Sucumbios. Escala 1: 750 000. IRD-Petroproducción. Quito, Ecuador.
- Letamendi, J.E., R.M. Pérez, A.D. Huertas and A.P. Bastardas. 2007. The Impact of carbonate cements on the reservoir quality in the Napo Fm sandstones (Cretaceous Oriente Basin, Ecuador). *Geologica Acta* 5(1): 89-107. <https://doi.org/10.1344/105.000000312>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015a. Perfil CSp-ÑVI_B2-95-0042. Memoria técnica del cantón Tiwintza. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2FxEjCF>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015b. Perfil CSp-ÑVI_C2-90-0100. Memoria técnica del cantón Gualaquiza. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/34zA7wj>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015c. Perfil CSp-PIII_B1-91-0025. Memoria técnica del cantón Cuyabeno. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2TiQnQv>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015d. Perfil CSp-PIII_E1-91-0008. Memoria técnica del cantón Orellana. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/36N8ukI>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016a. Memoria técnica del cantón El Chaco. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/35rnSDc>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016b. Panorámica del perfil CSp-ÑIV_D2-82-0019 y perfil CSp-ÑIV_D4-86-0023. Memoria técnica del cantón Mera. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/34BCpep>

- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016c. Panorámica del perfil CSp-OIII_E4-89-0035. Memoria técnica del cantón Tena. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2M5UBWY>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016d. Perfil CSp-ÑVI_C4-97-0014. Memoria técnica del cantón El Pangui. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. GAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/38H0ljE>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016e. Perfil CSp-OII_F3-85-0025. Memoria técnica del cantón Gonzalo Pizarro. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/34sprPX>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016f. Perfil CSp-OIII_C1-93-0023 y CSp-OIII_C1-93-0021. Memoria técnica del cantón Quijos. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2YUiqX9>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016g. Perfiles CSp-OIV_C2-90-0010, CSp-OIV_E1-99-0018 y CSp-OIV_C3-81-0019. Memoria técnica del cantón Pastaza. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. MAGAP. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2MbTbdF>
- Mejía, L. 1997. Suelos del Ecuador: Reconocimiento general en base a su capacidad-fertilidad y mapa general de clasificación por Capacidad-Fertilidad de los suelos del Ecuador: Una interpretación básica sobre las características de los suelos del Ecuador. FFJMD-INPOFOS-IGM-IPGH-SECS. Quito, Ecuador.
- Mena, C., R. Bilsborrow and M. McClain. 2006. Socioeconomic drivers of deforestation in the Northern Ecuadorian Amazon. *Environmental Management* 37(6): 802-815. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0230-z>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013a. Memoria técnica de geopedología del cantón Sucúa. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2S1zZTv>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013b. Perfil PN7-P108. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. MIDENA. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/36CATtU>
- Pacheco, R. 2009. El Ecuador: Recursos naturales agrícolas y del medio ambiente. Imprenta Colón. Quito, Ecuador.
- PRONAREG y ORSTOM. 1983a. Mapa morfo-edafológico de la provincia de Morona Santiago (zona sur) y Zamora Chinchipe, escala 1: 500 000. PRONAREG-ORSTOM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2qMOoYM>
- PRONAREG y ORSTOM. 1983b. Mapa morfo-edafológico de la provincia del Napo, escala 1: 500 000. MAG-PRONAREG-ORSTOM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2E6s2V3>
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to soil taxonomy. 10th ed. USDA - NRCS. Washington DC, USA. <http://bit.ly/2kEtubf>
- Sourdat, M. y A. Winckell. 1997. Los paisajes de la Amazonía ecuatoriana. En: A. Winckell, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). Los paisajes naturales del Ecuador. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2qHLZOR>

- Van der Hammen, T., J. Werner and H. Van Dommelen. 1973. Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its High-Andean biota. *Review of Palaeobotany and Palynology* 16(1-2): 1-122. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(73\)90031-6](https://doi.org/10.1016/0034-6667(73)90031-6)
- Zebrowski, C. y M. Sourdats. 1997. Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador. En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski y M. Sourdats (eds). *Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural*. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2kory6p>

—SUELOS— DE LAS ISLAS GALÁPAGOS

Lorena Lasso, Consultora: lore_lasso13@hotmail.com

José Espinosa, Consultor: [jespinosa@fragaria.com.ec](mailto:jespিনosa@fragaria.com.ec)

RESUMEN

Las Islas Galápagos se formaron por el ascenso del magma a la superficie a través de fallas y fracturas de la Placa de Nazca, la lava corrió libremente formando grandes mantos en planchas o enrollamientos que luego recibieron contribuciones piroclásticas de los volcanes activos. Aun al momento, el Archipiélago de Galápagos es uno de los sitios con mayor actividad volcánica del mundo. Debido a su importancia ambiental, las Islas Galápagos requieren de especial y cuidadoso manejo, por esta razón, las actividades humanas solo están permitidas en cuatro islas y en áreas que no estén incluidas dentro del Parque Nacional. En consecuencia, los estudios de suelos se condujeron solamente en áreas con intervención humana, donde son importantes para el manejo del suelo y evaluación de la tierra. Este capítulo presenta la información de las Islas Santa Cruz y San Cristóbal, debido a que estas son las islas que tienen el área más grande bajo intervención humana y porque tienen la mayor concentración poblacional. Las principales características de los suelos de Galápagos provienen de la alteración de depósitos piroclásticos relativamente recientes en diferentes condiciones de altitud, clima y vegetación. Los órdenes de suelo presentes bajo manejo agrícola en la Isla Santa Cruz son Alfisoles, Andisoles, Entisoles, Inceptisoles y Mollisoles, mientras que los órdenes presentes en las áreas bajo uso agrícola en la Isla San Cristobal son Alfisoles, Entisoles e Inceptisoles.

ABSTRACT

The Galapagos Islands were formed by the rise of magma to the surface through the faults and fractures of the Nazca Plate, lava flowed freely forming large sheet or coiled blankets, which later received pyroclastic contributions from the active volcanoes. Even now, the Galapagos archipelago is one of the sites with the greatest volcanic activity in the world. Due to its environmental importance, the Galapagos Islands require special and careful management, for this reason, human activities are allowed only in four islands and in areas that are not included within the National Park. Therefore, soil studies were conducted only in areas with human intervention, where surveys are important for soil management and land evaluation. This chapter presents the information for the Santa Cruz and San Cristobal Islands, because these islands have the largest soil area with human intervention, and the highest population concentration. The main characteristics of the Galapagos soils come from the alteration of relatively recent pyroclastic deposits in different conditions of altitude, climate, and vegetation. Soil orders present in areas under agricultural use in Santa Cruz Island are Alfisols, Andisols, Entisols, Inceptisols, and Mollisols, while soil orders present in areas under agricultural use in San Cristobal Island are Alfisols, Entisols and Inceptisols.

5.1. Introducción

Las Islas Galápagos se encuentran ubicadas a 1 000 km al este de la Costa ecuatoriana y están conformadas por 7 islas mayores: Isabela, Santa Cruz, Fernandina, Santiago, San Cristóbal, Floreana y Marchena; 14 islas menores: Española, Pinta, Baltra, Santa Fe, Pinzón, Genovesa, Rábida, Seymour Norte, Wolf, Tortuga, Bartolomé, Darwin, Daphne Mayor y Plaza Sur; 12 islas adicionales, 64 islotes y 136 rocas, acumulando una superficie aproximada de 8 000 km² (Ministerio del Ambiente, 2014). Solamente cinco de estas islas se encuentran pobladas: San Cristóbal, Santa Cruz e Isabela son parroquias urbanas, mientras que Floreana y Baltra son parroquias rurales (Granda y Choez, 2013).

Las condiciones particulares de clima inducidas por su ubicación en la línea ecuatorial y por el efecto de las corrientes marinas de Humboldt y El Niño han hecho del Archipiélago de Galápagos un lugar único en el mundo donde se han desarrollado flora y fauna singulares que atraen la visita de científicos y turistas de todo el planeta.

Las islas Galápagos fueron descubiertas por accidente por Fray Tomás de Berlanga en 1535, sin embargo, existen relatos que mencionan que el Inca Tupac Yupanqui realizó expediciones a la isla de Fuego (isla Isabela) y a la isla de Fuera (isla San Cristóbal) antes que los españoles. El descubrimiento reportado al Rey Carlos V de España hizo que el archipiélago fuera visitado por otros Españoles y que se difundiera su ubicación entre la gente de mar. Entre 1684 y 1816, el archipiélago fue frecuentemente visitado por piratas, quienes vieron a las islas como fuente de provisiones y agua y como un escondite luego de asaltar galeones españoles cargados de oro. En el año 1793, James Colnet pensó en la posibilidad de convertir a las islas en el centro de operaciones de barcos balleneros (Black, 1973).

Desde su descubrimiento hasta 1831, las islas Galápagos no pertenecieron a ninguna nación en particular. En 1832, el presidente de la República del Ecuador, Juan José Flores, autorizó una expedición con la misión de tomar posesión del Archipiélago, pasando a ser parte del territorio ecuatoriano. Algunos de los acontecimientos científicos y políticos relevantes en la historia de las islas Galápagos se presentan a continuación (Black, 1973; Congreso Nacional, 2001; Jäger, *et al.*, 2009):

- Charles Darwin visita las islas en 1835 para complementar sus estudios que dieron lugar a la teoría de la Evolución y que se publicaron en su libro “Origen de las Especies” en el año de 1859.
- Teodoro Wolf, científico comisionado por el gobierno del Ecuador, visita las islas en 1875 para realizar estudios geológicos, botánicos y zoológicos.
- Rollo Beck organiza una expedición auspiciada por la Academia de Ciencias de California en 1906. Llega acompañado de especialistas en geología, entomología, ornitología, botánica, zoología y herpetología, quienes realizaron estudios detallados en sus respectivas áreas.
- Misael Acosta Solís, geobotánico ecuatoriano, visita las islas en 1935 para recolectar muestras de la vegetación y publica sus observaciones en los anales de la Universidad Central del Ecuador.
- Durante la Segunda Guerra Mundial, el gobierno de los Estados Unidos estableció una base aeronaval en la isla Baltra con la autorización del gobierno del Ecuador.
- En 1959 el 97 % del área de las islas Galápagos fue declarado Parque Nacional por el Gobierno ecuatoriano.
- En 1979 la UNESCO declara al Archipiélago como Patrimonio Natural de la Humanidad y en 1985 lo declara Reserva de la Biósfera.
- En 2001 el Gobierno ecuatoriano establece control de los establecimientos humanos en las islas para limitar el crecimiento poblacional.

La historia de las investigaciones edafológicas de las islas Galápagos se inicia con la expedición científica internacional del año 1962, organizada por el Departamento de Geología de la Universidad de Ghent, auspiciada por la Fundación Charles Darwin y en cooperación con la Fundación Nacional de Investigación

Científica de Bélgica. Esta expedición recolectó información científica de diversa índole que incluía estudios geológicos, geomorfológicos y edafológicos (Laurrelle, 1966; Eswaran, *et al.*, 1973; Stoops, 2014; Taboada, *et al.*, 2016). El convenio entre la Oficina de Investigación Científica y Técnica de Ultramar (ORSTOM, por sus siglas en francés), el Instituto Nacional Galápagos (INGALA) y el Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG) permitió la realización de estudios temáticos de los recursos naturales de las islas Galápagos en 1987 (PRONAREG, 1987). Finalmente, el Programa Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS) realizó estudios temáticos completos para la valoración de tierras de las principales islas y los reportó en el 2011 (SIGTIERRAS, 2011).

Debido a su importancia científica, las islas Galápagos requieren un manejo especial y cuidadoso, por lo cual se permiten actividades antrópicas solo en cuatro islas y en áreas que no estén incluidas dentro del Parque Nacional.

Los estudios de SIGTIERRAS se condujeron, principalmente, en las áreas con intervención antrópica, donde los estudios edafológicos son importantes para el manejo del suelo y para valoración de la tierra, sin embargo, varios estudios reportan información nueva sobre los suelos en sitios puntuales en las islas Galápagos (Adelinet, *et al.*, 2008; Rial, *et al.*, 2017; Candra, *et al.*, 2019; Gerzabek, *et al.*, 2019). En el reporte de SIGTIERRAS se presenta la información de las islas San Cristóbal y Santa Cruz que tienen la mayor superficie de suelo intervenido por el hombre (**Figura 5.1**) y por ser las islas que tienen la mayor concentración de población. San Cristóbal tiene el 30 % de los habitantes de toda la provincia de Galápagos y en Santa Cruz se concentra el 61 % (Granda y Choez, 2013).

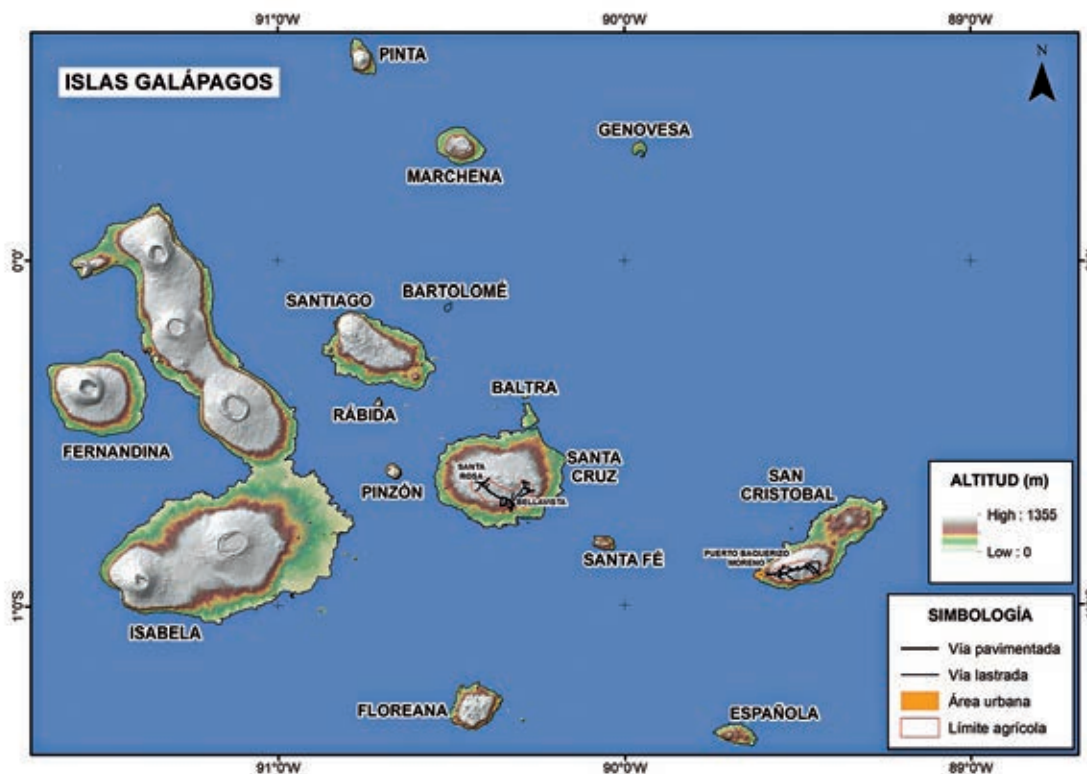


Figura 5.1. Área agrícola y ubicación de las islas Santa Cruz y San Cristóbal (Winckell, 1997).

La isla San Cristóbal tiene 567 km² y aproximadamente el 10 % de esta superficie está constituida por zonas aptas para uso agrícola, el resto corresponde a áreas pobladas o áreas incluidas en el Parque Nacional. La isla Santa Cruz tiene 988 km² y alrededor del 11 % de la superficie de la isla tiene aptitud agrícola y el resto corresponde a zonas pobladas o están también dentro del Parque Nacional (SIGTIERRAS, 2011; Granda y Choez, 2013).

5.2. Origen de las Islas

Las islas Galápagos se formaron hace 20 millones de años del manantial de magma, conocido como el punto caliente Galápagos, ubicado en el manto sobre la corteza superior entre las placas de Cocos y Nazca. El magma, al ascender, entró en contacto con la corteza promoviendo la formación de volcanes submarinos y aéreos, lo que originó la cordillera de Carnegie y luego la plataforma insular de Galápagos (**Figura 5.2**). La conformación geomorfológica actual de las islas se debe al ascenso del magma a la superficie por la presencia de fallas y fracturas que afectan a la Placa de Nazca (Sallarés, *et al.*, 2009). Aun al momento, las islas Galápagos constituyen uno de los sitios con mayor actividad volcánica del mundo. Sin embargo, las islas Santa Cruz y San Cristóbal, al ser las más antiguas, solo presentan remanentes de volcanes que ya no tienen ningún tipo de actividad (Acosta Solís, 1979).

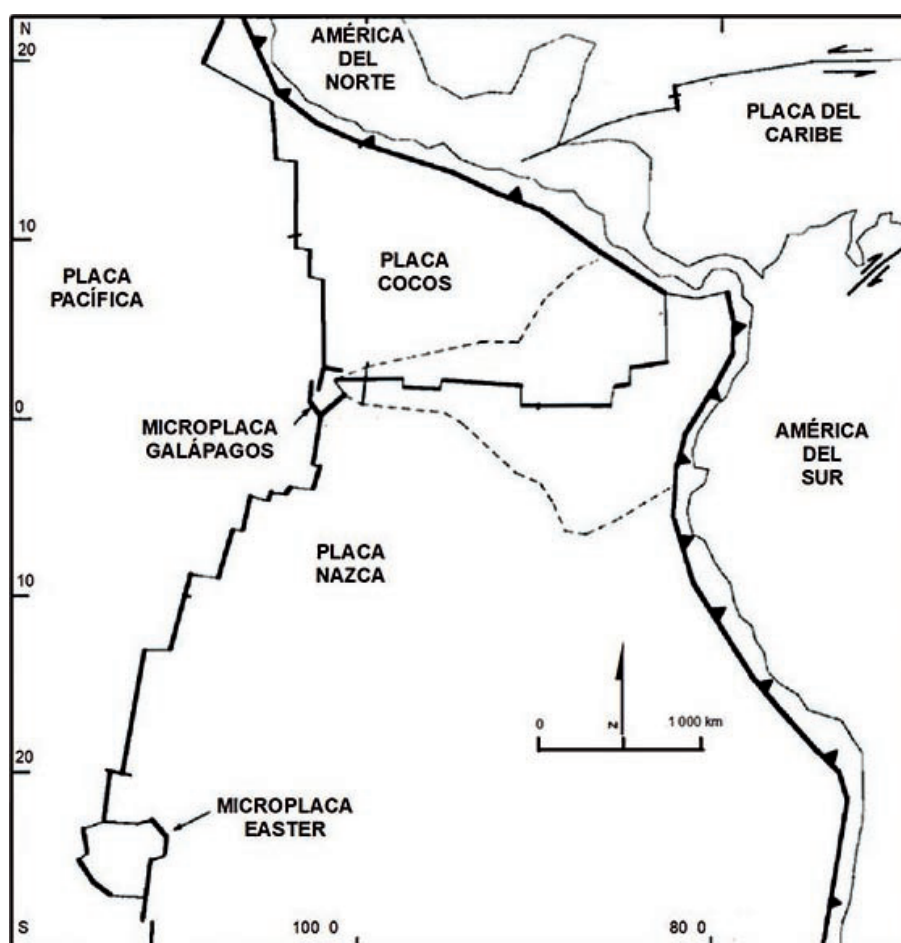


Figura 5.2. Las placas oceánicas y el archipiélago de Galápagos (Winckell, 1997).

5.3. Factores formadores del suelo

5.3.1. Geología y Geomorfología

Las dos unidades geológicas que dan origen a las islas Galápagos son las lavas basálticas submarinas levantadas de la plataforma y los volcanes jóvenes construidos por basaltos y materiales piroclásticos (Black, 1973). Las rocas del archipiélago son volcánicas en casi su totalidad y $< 1\%$ son rocas sedimentarias. Las islas Santa Cruz y San Cristóbal están conformadas por basaltos alcalinos ricos en magnesio, con presencia de volcanes con calderas erosionadas (Bristow y Hoffstetter, 1977). Los basaltos pueden ser afaníticos y porfiríticos con grandes fenocristales de plagioclasas, asociadas a intercalaciones de sedimentos de origen submarino (Winckell, 1997).

Las islas se han formado por la acumulación de dos tipos de lava, aquella que ha fluido libremente formando grandes mantos en planchas o enrollamientos (lava tipo pahoehoe o planchonada) y la que por su viscosidad ha sido lanzada en bloques que luego se han revuelto formando aristas agudas y cortantes que impiden el ingreso al interior de las islas (lava denominada quemado o AA) (Black, 1973).

El basalto afanítico, muy coherente y medianamente poroso, se meteoriza lentamente, mientras que las proyecciones piroclásticas se meteorizan rápidamente. Los bloques de lavas tipo AA tienen un proceso de alteración más veloz que los mantos de lava tipo pahoehoe (Winckell, 1997).

El paisaje de la mitad oriental de la isla San Cristóbal y las partes noreste y sur de la isla Santa Cruz se caracterizan por presentar relieves de suaves a moderados, mesetas de coladas basálticas de parcial origen submarino, pequeños conos de escorias cimerales y que no presentan construcciones volcánicas altas como en las otras islas. Estas áreas se caracterizan por presentar volcanes escudos, parcialmente erosionados, cuyas calderas son difíciles de identificar. En las dos islas se identifica una parte basal extensa con pendientes suaves, que van aumentando hacia la parte alta, con pendientes más fuertes y que gradualmente se juntan con los modelados cimerales planos a suavemente ondulados (Winckell, 1997).

5.3.2. Clima

Las islas Galápagos tienen las mismas condiciones climáticas que la región costera del Ecuador continental, es decir, tienen la influencia de importantes corrientes marinas antagónicas que modifican el clima: la corriente cálida del Niño por el Norte y las corrientes frías de Humboldt por el Sur y de Cromwell por el Este (Winckell, 1997; Chiriboga, *et al.*, 2006). Por esta razón, las islas presentan dos estaciones climáticas marcadas, la estación cálida que va de enero a mayo y la estación fría que se extiende de junio a diciembre (Chiriboga, *et al.*, 2006).

Por otro lado, la cantidad de lluvia de las islas está influenciada por la altura. Las partes altas, sobre los 200 m s. n. m., reciben precipitaciones mayores a 400 mm durante todo el año, mientras que en las partes bajas, a nivel del mar, y dependiendo del tipo de estación, reciben 200 mm de precipitación, en la estación cálida o menos durante la estación fría (**Cuadro 5.1**) (Trueman and d'Ozouville, 2010). Los datos de las estaciones meteorológicas ubicadas en la isla Santa Cruz demuestran que las precipitaciones son bajas a nivel del mar, sin embargo, las precipitaciones aumentan en las laderas expuestas a los vientos cargados de humedad (Winckell, 1997).

La oscilación de la corriente del sur tiene dos extremos, una fase cálida conocida como El Niño y una fase fría, conocida como La Niña. Este fenómeno afecta periódicamente las condiciones climáticas de las islas Galápagos. El Niño, que puede aparecer a partir de diciembre, incrementa la temperatura y las precipitaciones, mientras que la Niña reduce significativamente la temperatura y la precipitación (Trueman and d'Ozouville, 2010).

Cuadro 5.1. Promedios de temperatura y precipitación reportados por dos estaciones meteorológicas en la isla Santa Cruz (Estación Meteorológica Charles Darwin, 2014).

Época del año	Estación Puerto Ayora (a nivel del mar)		Estación Bellavista (a 200 m s. n. m.)	
	Temperatura °C	Precipitación (mm)	Temperatura °C	Precipitación (mm)
Cálida (enero a mayo)	26.2	274.7	24.9	696.3
Fría (junio a diciembre)	22.5	79.4	21.2	497.3

Existe una gradiente de temperatura en las islas que hace que la temperatura se reduzca en 0.65 °C por cada 100 m de incremento en altitud, condición que contrasta con los 0.3 °C por cada 100 m prevalente en el Ecuador continental (Huttel, *et al.*, 1999). Sin embargo, este dato no se puede extrapolar a las partes altas de las otras islas por falta de información, en estos sitios el promedio anual de temperatura sería de 0 °C a 1 800 m de altitud, si se aplicasen las relaciones de temperatura descritas para las islas (Huttel, 1997).

5.3.3. Vegetación

Se ha encontrado que en las Islas Galápagos existen 560 plantas nativas y 700 introducidas por los colonos y otras actividades antrópicas (Jäger, *et al.*, 2009). Por otro lado, la zonificación bioclimática de Galápagos demuestra que existe una relación estrecha entre los pisos climáticos y el tipo de vegetación (Black, 1973; Huttel, 1986). A continuación se presentan las zonas bioclimáticas definidas por Black (1973) que describen apropiadamente la distribución de la vegetación en las islas (**Figura 5.3**).

5.3.3.1. Zona Litoral (borde hidrohalofítico)

Esta zona está localizada a una altitud de entre 0 a 10 m s. n. m. y se caracteriza por tener plantas halofíticas que crecen expuestas al agua de mar y suelos muy salinos como manglares (*Rhizophora mangle*), arrayancillos (*Maytenus octogona*), manzanillos (*Hippomane mancinella*) y plantas suculentas pequeñas. Esta zona está conformada por áreas rocosas y playas arenosas.

5.3.3.2. Zona Seca (playa o faja seca)

Con una altitud que varía entre 10 y 100 m s. n. m., la vegetación de esta zona es xerofítica de gran resistencia y que ha logrado adaptarse las condiciones rocosas y a la falta de humedad. Predominan la tuna (*Opuntia galapageia*), cactus (*Jasminocereus thouarsii*), espinos blancos (*Scutia pauciflora*), palo santo (*Bursera graveolens*) y arbustos espinosos.

5.3.3.3. Zona Transicional (zona del pega pega)

La altitud en esta zona está en el rango de 100 a 180 m s. n. m. y la vegetación se caracteriza por ser xerofítica y mesófita de clima árido y húmedo. Se forman asociaciones entre algarrobos (*Acacia insulae-iacobi*), palo santo (*Bursera graveolens*), cactus (*Jasminocereus thouarsii*), uña de gato (*Zanthoxylum fagara*), helechos (*Elaphoglossum firmum*) y plantas epífitas.

5.3.3.4. Zona del Scalesia (región húmeda)

En esta zona la altitud varía de 180 a 400 m s. n. m., la vegetación es mesófita de plantas epífitas, helechos, lianas, pero aquí predominan las scalesias (*Scalesia affinis*), miconias (*Miconia robinsoniana*) y guayabillos (*Psidium galapageium*). En esta zona también se encuentran los cultivos de café (*Coffea arábica*), asociados con plátano (*Musa paradisiaca*) para sombra, y pastos naturales donde se cría ganado.

5.3.3.5. Piso Superior (zona de miconias, helechos)

La altitud de esta zona va de 400 a 550 m s. n. m. y en ella predominan los cacaotillos (*Miconia robinsoniana*), helechos arbóreos (*Cyathea weatherbyana*) y orquídeas. A partir de los 550 m s. n. m. la vegetación se caracteriza por la presencia de gramíneas como *Paspalum pinicillatum*, *Paspalum longepedunculatum*, *Panicum colonum*, *Calamagrostis pumila*, material vegetal semejante al que crece en los páramos andinos.

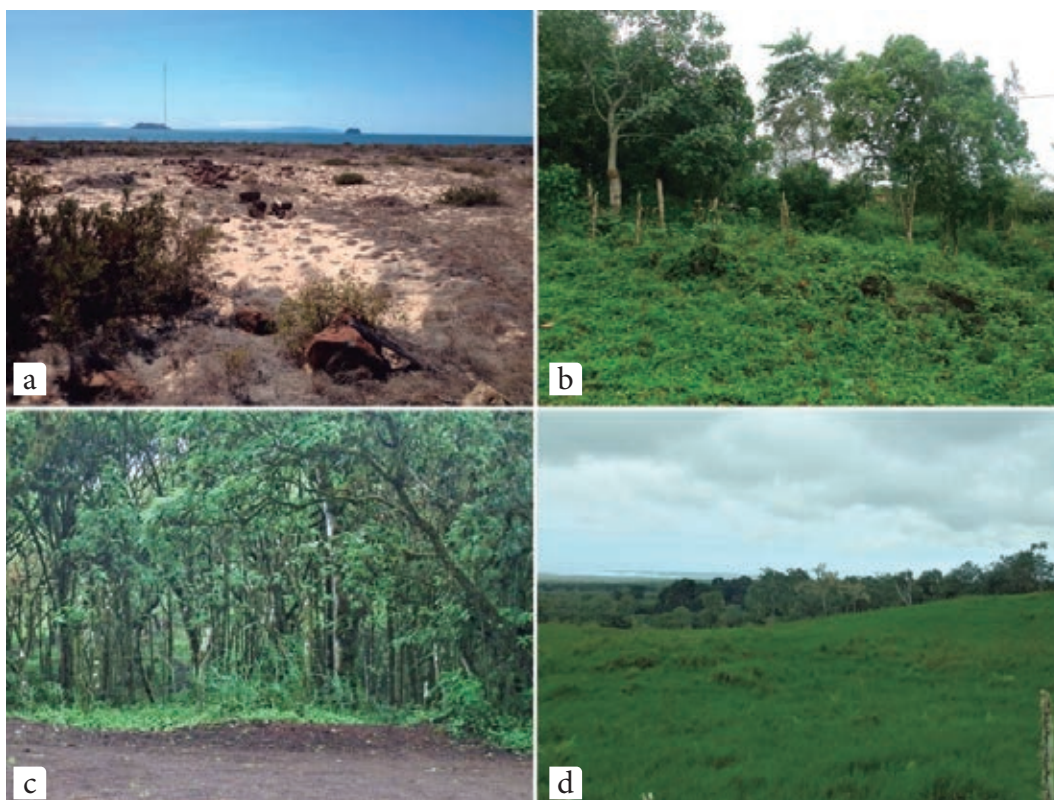


Figura 5.3. Vegetación típica de las islas Santa Cruz y San Cristóbal: a) vegetación de la zona litoral; b) vegetación de la zona transicional; c) zona del scalesia; d) pastos naturales y gramíneas (Fotos de Carla Lasso).

5.4. Suelos de la Isla Santa Cruz

Los estudios realizados por el grupo PRONAREG-ORSTOM-INGALA en la Isla Santa Cruz identificaron tres zonas distintas (PRONAREG, 1987): a) parte alta muy húmeda y templada, b) parte intermedia húmeda y cálida y c) parte baja seca a muy seca y cálida. Estas zonas se definieron basándose en la relación que existe entre pisos altitudinales, clima y vegetación, es decir, se tomaron en cuenta los factores determinantes para la formación de los suelos.

Las principales características de estos suelos provienen de la alteración de los relativamente recientes depósitos piroclásticos en diferentes condiciones de altitud, clima y vegetación. En la **Figura 5.4** se presenta una fotografía de un paisaje típico y en la **Figura 5.5** el mapa de suelos de la isla Santa Cruz.



Figura 5.4. Paisaje de la isla Santa Cruz: construcciones volcánicas bien conservadas, planicies onduladas (Foto de Gustavo Tapia).

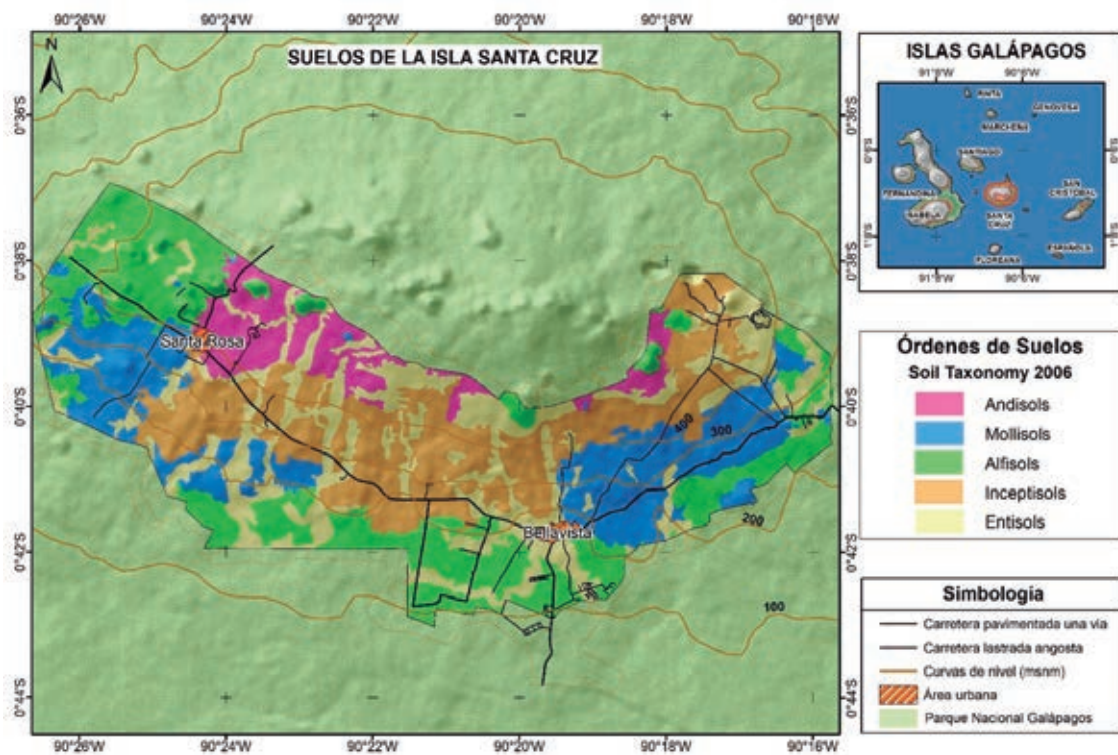


Figura 5.5. Mapa de suelos de la isla Santa Cruz (PRONAREG, 1987; SIGTIERRAS, 2011).

5.4.1. Parte alta muy húmeda y templada

Esta sección de los suelos de la isla, que se encuentra en la zona de las miconias y asciende hacia la zona de gramíneas, recibe una precipitación que varía de 800 a 1 800 mm y alcanza temperaturas que van de 21 a 19 °C (SIGTIERRAS, 2011). El paisaje se caracteriza por la presencia de pequeños conos volcánicos bien conservados junto a otros en proceso de destrucción, relieves planos a ligeramente ondulados con acumulación de piroclastos y cenizas y evidencia de canales de escurrimientos con afloramientos rocosos y depósitos coluviales con depósitos areno-limo-gravillosos (**Figura 5.6**). Los paisajes de esta zona son, en muchos aspectos, parecidos a los páramos andinos (Winckell, 1997).



Figura 5.6. Parte alta muy húmeda y templada, con suelos de color pardo rojizo y presencia de grandes fragmentos de roca (Foto de Carla Lasso).

En esta zona la influencia de la roca basáltica va desapareciendo y se pueden observar fragmentos de roca basáltica en medio de los depósitos piroclásticos. Este cambio se evidencia en las características de los suelos que presentan pH ligeramente ácido a ácido, baja saturación de bases, contenidos constantes de carbono orgánico y presencia de alófana (**Cuadro 5.2**) (Laurelle, 1966).

Cuadro 5.2. Características del perfil de suelo descrito por la Misión Geopedológica de la Universidad de Ghent (Laurelle, 1966), que se clasifica como Andisol (Soil Survey Staff, 2006).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A11	0-6	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura: arcillosa; estructura: granular, muy friable a friable; pH: 6.0; humífero; CIC: 66 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 4.3 %.
A12	6-20	Color en húmedo: pardo oscuro (10YR 3/3); textura: ligeramente arcillosa; estructura: masiva, muy friable pH: 6.2; menos humífero; CIC: 69 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 5.3 %.
C	20-90	Color primario en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) y color secundario en húmedo: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); estructura: masiva, muy friable a friable, presencia de muchas tobas; pH: 6.0; CIC: 47 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: muy baja.

Los suelos de esta zona se clasifican como Andisoles y tienen las siguientes características: color pardo amarillento, franco limosos, medianamente profundos, moderada reacción al NaF, densidad aparente menor a 0.9 g cm⁻³ y pH ligeramente ácido. En las faldas de los conos volcánicos se pueden encontrar suelos clasificados como Typic Hapludands, mientras que en zonas coluviales se encuentran Lithic Hapludands con presencia de fragmentos gruesos (SIGTIERRAS, 2011).

5.4.2. Parte intermedia húmeda y cálida

Los suelos de esta zona están ubicados entre 200 y 400 m s. n. m., con precipitaciones de 800 a 1 000 mm y temperaturas de 21 a 23 °C (SIGTIERRAS, 2011). Corresponden al gran paisaje de vertientes conformado por superficies de lava poco disectadas y canales de escurrimiento donde se acumulan depósitos coluvio aluviales (Winckell, 1997). Debido a su ubicación, las lavas de esta zona presentan mayor alteración y los afloramientos rocosos presentan superficies muy desgastadas con recubrimiento parcial de material piroclástico (Figura 5.7) (SIGTIERRAS, 2011).



Figura 5.7. Parte intermedia húmeda cálida, desarrollo de Scalesias sobre roca (Foto de Carla Lasso).

Esta zona se caracteriza por presentar material basáltico meteorizado mezclado con varios depósitos de material piroclástico. Se identificaron dos tipos de suelos caracterizados por tener una secuencia de horizontes A/B/C, pero uno de ellos presenta un horizonte B con una estructura desarrollada -Bw- (Inceptisol), mientras que el otro se caracteriza por presentar un horizonte B enriquecido con arcilla -Bt- (Alfisol) (Laurelle, 1966).

Por otro lado, los estudios realizados por PRONAREG demostraron que los suelos predominantes de esta zona pertenecen al subgrupo Typic Dystrudepts (Soil Survey Staff, 1975), orden Inceptisoles (hasta 1987). Son suelos pardo rojizos, franco arcillo-limosos, con ligera reacción al NaF, moderadamente profundos, con una saturación de bases menor al 50 %, pH ligeramente ácido y fertilidad mediana. Este tipo de suelos se observa en las superficies de lava de pendiente ligera, mientras que en los depósitos coluvionados, con presencia de gravilla y afloramientos rocosos, correspondientes a los flujos de lava, se pueden encontrar suelos clasificados como Lithic Dystrudepts (PRONAREG, 1987).

La presencia de la roca basáltica sobre la cual se desarrollaron estos suelos se evidencia en el pH y en la saturación de bases. La presencia de material piroclástico es responsable de su textura (Laurelle, 1966). Adicionalmente, el estudio de PRONAREG encontró Alfisoles, cuyo subgrupo más representativo es el Typic Hapludalfs y Mollisoles con predominancia del subgrupo Typic Argiudolls (PRONAREG, 1987), coincidiendo con la caracterización de los suelos hecha por la Misión Geopedológica de Ghent (**Cuadro 5.3**).

Cuadro 5.3. Características del perfil de suelo descrito por la Misión Geopedológica de la Universidad de Ghent (Laurelle, 1966), que se clasifica como Argiudolls (Soil Survey Staff, 1975; PRONAREG, 1987).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A11	0-5	Color en húmedo: pardo oscuro (7.5YR 3/2); textura: franco limosa; estructura: granular fuerte, muy friable a friable; pH: 7.4; humífero; CIC: 50 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 72 %.
A12	5-13	Color en húmedo: pardo oscuro (7.5YR 3/2); textura: franco limosa; estructura: granular moderada, firme, con pocos fragmentos de roca; pH: 7.0; humífero; CIC: 51 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 57.5 %.
Bt	13-40	Color en húmedo: pardo (10YR 4/3); textura: franco limosa; estructura: bloques subangulares finos de grado moderado, con recubrimientos de arcilla en los poros y muchos fragmentos pequeños y medianos de roca; pH: 6.8; CIC: 36 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 74 %.
C	40-75	Color en húmedo: pardo rojizo (5YR 4/4); estructura: material tobáceo mezclado con cenizas; pH: 6.5; CIC: 37 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 68 %.

5.4.3. Parte baja seca a muy seca y cálida

Esta zona se encuentra ubicada entre 100 y 200 m s. n. m., recibe precipitaciones de 600 a 800 mm y tiene temperaturas promedio de 24 °C (SIGTIERRAS, 2011). Los suelos en esta zona se encuentran en superficies onduladas producto de los flujos de lava del tipo Pahoehoe. Estas emisiones antiguas, de débil meteorización, están colonizadas por vegetación arbustiva (Winckell, 1997).

Los suelos representativos de esta zona son los Alfisoles, seguidos en importancia por Mollisoles y Entisoles. Los Alfisoles, que se desarrollaron sobre superficies de lava ondulada, corresponden al subgrupo Vertic Haplustalfs, se caracterizan por tener color pardo rojizo, textura arcillosa, moderadamente profundos, presencia de grietas, saturación de bases > 50 %, CIC > 30 cmol kg⁻¹, pH 7.2 y mediana fertilidad (PRONAREG, 1987). Dentro de los Mollisoles se destaca el subgrupo Lithic Argiustolls ubicado en vestigios de conos poco conservados que aparecen sobre superficies onduladas (**Figura 5.8** y **Cuadro 5.4**). En los Entisoles, el subgrupo más destacado es el Typic Ustorthents que está localizado en vertientes de pendientes moderadas con presencia de muchos fragmentos gruesos y afloramiento de rocas. Estos

suelos se caracterizan por tener una secuencia de horizontes A/C desarrollados principalmente sobre arcillas alteradas de rocas basálticas (PRONAREG, 1987), el rango de pH y de saturación de bases va de 6.5 a 7.5 y de 70 a 85 %, respectivamente. La fracción de arcilla contiene halloysita y esmectita, con menores cantidades de feldspatos. Micromorfológicamente, se evidencia la presencia de revestimientos de arcilla, indicando que existen procesos de iluviación (Stoops, 2014).

Cuadro 5.4. Características del suelo descrito por la Misión Geopedológica de la Universidad de Ghent (Laurelle, 1966), que se clasifica como Argiustolls (Soil Survey Staff, 1975; PRONAREG, 1987).

Horizontes	Profundidad (Cm)	Descripción
A11	0-20	Color en húmedo: pardo rojizo oscuro (5YR 2.5/2); textura: arcillosa; estructura: granular fuerte, con pequeños revestimientos en los poros; pH: 7.1; húmifero; CIC: 59 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 78.3 %.
A12	20-36	Color en húmedo: pardo rojizo oscuro (5YR 3/2); textura: arcilla pesada; estructura: masiva, con muchos fragmentos de roca meteorizada; pH: 6.8; menos húmiferos; CIC: 31.1 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 64 %.
Bt	36-70	Color en húmedo: pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura: arcillosa; estructura: bloques angulares gruesos de grado débil, muy firme y compacta, con recubrimientos de arcilla a través y dentro de los agregados, de difícil penetración para las raíces; pH 6.7; CIC 50.9 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 89 %.
R	70+	Material parental inalterado.



Figura 5.8. Corte de un suelo con presencia de muchas rocas clasificado como Lithic Argiustolls (Foto de Gustavo Tapia)

Como se indicó anteriormente, las áreas donde se desarrollaron los estudios edafológicos son aquellas donde se realizan actividades agrícolas, que son una pequeña porción del área total de la isla. Las regulaciones de conservación no permiten que se expandan las áreas agrícolas en las islas Galápagos. En el **Cuadro 5.5** se presentan los porcentajes de cada uno de los órdenes de suelos ubicados en la tierra ocupada por actividad agrícola en la isla Santa Cruz.

Cuadro 5.5. Órdenes de suelos encontrados en la tierra de uso agrícola de la isla Santa Cruz. (SIGTIERRAS, 2011).

Órdenes (Soil Survey Staff, 2006)	%
Alfisol	25.9
Andisol	8.1
Entisol	23.1
Inceptisol	23.0
Mollisol	19.9

5.5. Suelos de la Isla San Cristóbal

El área donde se desarrollan actividades agrícolas en isla San Cristóbal ocupa el 17.7 % del área total de la isla. En esta área se identifican cuatro zonas: a) parte alta temperada húmeda y muy húmeda, b) parte intermedia húmeda y cálida, c) parte baja seca y cálida y d) parte baja muy seca a árida y cálida. Estas zonas están clasificadas conforme a la relación existente entre los factores de formación de los suelos como pisos altitudinales, clima y vegetación.

El paisaje en la parte alta de la isla está conformado por planicies onduladas cimeras, con presencia de construcciones de escorias bien conservadas, relieves fuertes y moderados. La parte baja se encuentra conformada por vertientes suaves en los flancos inferiores y valles coluvio aluviales. La parte occidental de la isla está constituida por un antiguo volcán escudo sin actividad reciente, cuya caldera va desapareciendo. Los suelos de esta área presentan un estado más avanzado de evolución morfológica (Winckell, 1997).

La isla San Cristóbal es más antigua que la Isla Santa Cruz, por lo tanto, los procesos pedogénéticos son mucho más avanzados (Stoops, 2014). Son suelos rojos altamente cohesivos que se encuentran desde las partes altas muy húmedas hasta las partes bajas secas (Franz, 1980). En la mayoría de paisajes predominan los Alfisoles, pero también se reporta la presencia de pequeñas áreas con Entisoles, principalmente en los valles coluvio aluviales donde se acumulan depósitos areno-limosos con gravillas (Winckell, 1997).

5.5.1. Parte alta húmeda y parte alta muy húmeda, templadas

Esta zona se encuentra sobre los 410 m s. n. m., con precipitaciones > a 1 200 mm y temperaturas de 21 a 18 °C (SIGTIERRAS, 2011). Se caracteriza por presentar superficies onduladas con presencia de pequeños edificios cónicos bien conservados, conformados por abundantes proyecciones de escorias y lapillis, responsables de la cobertura piroclástica en la cima (Winckell, 1997). Estudios de la mineralogía de esta zona encontraron altos contenidos de gibsita asociados con arcillas tipo 1:1, como la caolinita y algunas veces asociados a hematita (Adelinet, *et al.*, 2008). Las partes altas de la isla San Cristóbal, a diferencia de otras islas, presentan fuerte humedad atmosférica y altas precipitaciones, condiciones climáticas que se evidencian en la vegetación constituida principalmente por *Myconias* (*Miconia robinsoniana*) (Winckell, 1997).

Los estudios realizados por PRONAREG (1987) encontraron que los suelos de esta zona son de color rojizo, textura arcillosa, moderadamente profundos a profundos sobre roca basálticas, pH 5.3, CIC < 24 cmol kg⁻¹ y saturación de bases < 50 %, características que permiten clasificarlos como Alfisoles, subgrupo Typic Rhodudalfs. Estos suelos están presentes en los conos escoriáceos y en superficies de disección variable donde existe material piroclástico bien meteorizado. También se identificaron, en menor proporción, Inceptisoles, subgrupo Oxic Dystrudepts, de texturas franco arcillo limosas y con presencia de gravas, con las mismas características químicas de los suelos presentes en las superficies onduladas de esta zona.

En la descripción del suelo del **Cuadro 5.6** se destaca la presencia de horizontes úmbrico y argílico, además de características ándicas y una densidad aparente > 1 g cm⁻³ (ISRIC, 1993).

Cuadro 5.6. Características del perfil de suelo descrito por Kauffman y del Posso (ISRIC, 1993), que se clasifica como Typic Rhodudalfs (Soil Survey Staff, 2006).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0-12	Color en húmedo: pardo rojizo oscuro (5YR 3/4); textura: arcillosa; estructura, ligeramente adherente y plástica; bloques subangulares finos y medios de grado moderado, con muchos poros finos tubulares; pH: 4.4; carbono orgánico: 5.1 %; CIC: 31 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 5 %.
Bts1	12-95	Color en húmedo: rojo oscuro (2.5YR 3/6); textura: arcillo limosa, ligeramente adherente y plástica; estructura: bloques subangulares finos a medios de grado moderado, con presencia de cutanes de arcilla y sesquióxidos; pH: 4.8; carbono orgánico: 1.4 %; CIC: 20.3 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 1 %.
Bts2	95-142	Color en húmedo: rojo oscuro (2.5YR 3/6); textura: franco limosa, ligeramente adherente y plástica; estructura: bloques subangulares finos y medios de grado moderado, muy friable, con cutanes de arcilla y sesquióxidos; pH: 4.7; carbono orgánico: 0.4 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 1 %.
C	142-200	Color en húmedo: pardo rojizo (5 YR 4/4); textura: franco limosa; estructura masiva porosa, muy friable, con presencia de fragmentos fuertemente meteorizados de basalto y pómez; pH: 4.8; carbono orgánico: 0.2 %.

5.5.2. Parte intermedia húmeda y cálida

Esta zona se localiza entre 300 a 410 m s. n. m., con precipitaciones de 800 a 1 200 mm y temperaturas de 22 a 21 °C (SIGTIERRAS, 2011). Se observan superficies planas a ligeramente onduladas, con presencia de valles e interfluvios que constituyen la red de drenaje durante la estación lluviosa. Estos canales de escurrimiento se caracterizan por presentar fuertes entalladuras, heredadas de un periodo más húmedo, con escurrimientos importantes que produjeron excavaciones de magnitud (Winckell, 1997). Los suelos de esta zona se clasifican como Alfisoles con características vérticas (Vertic Hapludalfs) que se desarrollaron sobre las superficies planas y ligeramente onduladas, caracterizadas por tener color pardo rojizo, textura arcillosa, profundos, con presencia de grietas, saturación de bases > 50 % , CIC < 24 cmol kg⁻¹ y pH 6.2 (PRONAREG, 1987).

5.5.3. Parte baja seca y cálida

Esta zona se localiza entre 200 a 300 m s. n. m., con precipitaciones de 600 a 1 000 mm y temperaturas de 23 a 22 °C (SIGTIERRAS, 2011). El paisaje está compuesto por vertientes suaves, planicies poco inclinadas y disectadas por los valles coluvio aluviales que vienen desde las partes cimera (Winckell, 1997). Los suelos de esta zona se clasifican como Alfisoles, subgrupo Vertic Haplustalfs, de color pardo rojizo, franco arcillo limosos a arcillosos (con presencia de esmectitas), profundos, generalmente agrietados, pH ligeramente ácido, saturación de bases > 50 % y CIC de ~ 24 cmol kg⁻¹ (Adelinet, *et al.*, 2008). En el perfil que se presenta del **Cuadro 5.7** se observa la presencia de características vérticas y un horizonte argílico (ISRIC, 1993).

Cuadro 5.7. Características del perfil de suelo descrito por Kauffman y del Posso (ISRIC, 1993), que se clasifica como Vertic Haplustalfs (Soil Survey Staff, 2006).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0-10	Color en húmedo: pardo rojizo oscuro (5YR 3/2); textura: arcillosa, adherente y plástica; estructura: bloques subangulares finos a medios de grado moderado y granular tamaño medio de grado moderado, con pocos fragmentos de basalto muy meteorizados; pH: 6.5; carbono orgánico: 6.8 %; CIC: 50 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases 96 %.
BA	10-30	Color en húmedo: pardo rojizo oscuro (5YR 3/4); textura: arcillosa, adherente y plástica; estructura: bloques angulares medios y gruesos de grado fuerte, con pocos fragmentos de basalto medianos fuertemente meteorizados; pH: 6.3; carbono orgánico: 1.9 %; CIC: 31 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 87 %.
Bt	30-67	Color en húmedo: rojo amarillento (5YR 4/6); textura: arcillosa, adherente y plástica; estructura: bloques angulares gruesos de grado fuerte, finos y medios; pH: 5.4; carbón orgánico: 0.9 %; CIC: 38 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 78 %.
C	67-150	Color en húmedo: pardo fuerte (7.5YR 5/6); textura: franco arcillo arenosa; estructura: masiva porosa, muy friable, con presencia de muchos fragmentos de basalto fuertemente meteorizados; pH: 6.1; carbono orgánico: 0.3 %; CIC: 44.8 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 90 %.

5.5.4. Parte baja muy seca a árida y cálida

Esta zona está ubicada a una altitud < 100 m s. n. m., con precipitaciones < 600 mm y temperaturas de 25 a 23 °C (SIGTIERRAS, 2011). Se caracteriza por presentar vertientes suaves poco disectadas, provenientes de emisiones volcánicas antiguas que fueron colonizadas por vegetación arbustiva que cubre las zonas áridas y secas. La meteorización fue débil debido al clima, por esta razón, se observan en la superficie afloramientos rocosos y facies más arcillosas y rojizas ricas en grava y gravilla (Winckell, 1997). La mayoría de los suelos de esta zona se clasifican como Alfisoles (**Figura 5.9**), subgrupo Lithic Haplustalfs, pardo rojizos, franco arcillo limosos, poco profundos (contacto con el material parental), pH ligeramente ácido, saturación de bases > 50 % y CIC ~ 24 cmol kg⁻¹ (PRONAREG, 1987). El **Cuadro 5.8** se detalla la distribución de los suelos de la isla San Cristóbal.

- Chiriboga, R., B. Fonseca y S. Maignan. 2006. Zonificación agroecológica de las zonas agropecuarias en relación con las especies invasoras. En: INGALA (ed). Proyecto ECU/00/G31: Especies invasoras de las Galápagos. MAE, INGALA, UNDP. Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador.
- Congreso Nacional. 2001. Ley Especial para la Provincia de Galápagos. Resolución Legislativa No. 22-058, publicada en Registro Oficial 280. Registro Oficial del Gobierno de Ecuador. Quito, Ecuador. <https://www.registroficial.gob.ec/index.php/registro-oficial-web/publicaciones/registro-oficial/item/4506-registro-oficial-no-280.html>
- Estación Meteorológica Charles Darwin. 2014. Anuario Meteorológico. INAMHI. Santa Cruz, Galápagos, Ecuador.
- Eswaran, H., G. Stoops and P. de Paepe. 1973. A contribution to the study of soil formation on isla Santa Cruz, Galápagos. Bulletin de la Societé Belge de Pédologie 13: 100-122.
- Franz, H. 1980. Old soils and land surfaces on the Galápagos Islands. Geo Journal 4(2): 182-184. <https://doi.org/10.1007/BF00705525>
- Gerzabek, M.H., A. Bajraktarevic, K. Keiblinger, A. Mentler, M. Rechberger, J. Tintner, *et al.* 2019. Agriculture changes soil properties on the Galápagos Islands—two case studies. Soil Research 57(3): 201-214. <https://doi.org/10.1071/SR18331>
- Granda, M. y G. Choez. 2013. Población y migración en Galápagos. In: DPNG, CGREG, FCD and GC (eds). Informe Galápagos 2011- 2012. DPNG-CGREGE-FCD-GC. Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador. <https://www.galapagos.org/wp-content/uploads/2019/09/2013-6-HUMAN-SYS-pop-migration.leon-salazar.pdf>
- Huttel, C. 1986. Zonificación Bioclimatológica y Formaciones Vegetales en las Islas Galápagos. Revista Cultura.
- Huttel, C. 1997. Las grandes regiones climáticas y sus formaciones vegetales naturales En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebronski y M. Sourdat (eds).
- Paisajes naturales del Ecuador: las condiciones generales del medio natural. CEDIG - IPGH - IRD - IGM. Quito. <https://bit.ly/2m3acjf>
- Huttel, C., C. Zebronski, P. Gondard y J. Bourliaud. 1999. Paisajes agrarios de Ecuador. IFEA-IGM-IPGH-IRD-PUCE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2kozCEL>
- ISRIC. 1993. Soil Reference Profiles of Ecuador: Field and Analytical Data. ISRIC (International Soil Reference Information Centre). Wageningen.
- Jäger, H., I. Kowarik and A. Tye. 2009. Destruction without extinction: long-term impacts of an invasive tree species on Galápagos highland vegetation. Journal of Ecology 97(6): 1252-1263. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01578.x>
- Laurelle, J. 1966. Study of a soil sequence on Idefatigable Island. In: Symposia of the Galápagos International Scientific Project. University of California Press. California.
- Ministerio del Ambiente. 2014. Parque Nacional Galápagos. Disponible en <http://www.ambiente.gob.ec/parque-nacional-galapagos/>
- PRONAREG. 1987. Inventario cartográfico de los recursos naturales, geomorfología, vegetación y biofísicos de las Islas San Cristóbal y Santa Cruz. PRONAREG - INGALA. Quito, Ecuador.
- Rial, M., A. Martínez-Cortizas, T. Taboada and L. Rodríguez-Lado. 2017. Soil organic carbon stocks in Santa Cruz Island, Galapagos, under different climate change scenarios. Catena 156: 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.03.020>

- Sallarés, V., P. Charvis y A. Calahorrano. 2009. Naturaleza y formación de la Provincia volcánica de Galápagos. En: J. Collot, V. Sallares y N. Pazmiño (eds). Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. CNDM-IRD-INOCAR. Guayaquil, Ecuador. p. 203-221. <https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/36-geologia-y-geofisica-marina-y-terrestre-del-ecuador>
- SIGTIERRAS. 2011. Cartografía temática de los cantones: San Cristobal y Santa Cruz. MAGAP. Quito, Ecuador.
- Soil Survey Staff. 1975. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agricultural Handbook N° 436. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture. Washington DC, USA. <http://bit.ly/2T163rd>
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to soil taxonomy. 10th ed. USDA - NRCS. Washington DC, USA. <http://bit.ly/2kEtubf>
- Stoops, G. 2014. Soils and paleosoils of the Galápagos Islands: What we know and what we don't know. A meta-analysis University of Hawai Press. Hawai, USA. <https://doi.org/10.2984/68.1.1>
- Taboada, T., L. Rodríguez-Lado, C. Ferro-Vázquez, G. Stoops and A. Martínez-Cortizas. 2016. Chemical weathering in the volcanic soils of Isla Santa Cruz (Galápagos Islands, Ecuador). Geoderma 261: 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.019>
- Trueman, M. and N. d'Ozouville. 2010. Characterizing the Galapagos terrestrial climate in the face of global climate change. Galapagos Research 67: 26-37.
- Winckell, A. 1997. Los paisajes de las Islas Galápagos. En: A. Winckell, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). Los paisajes naturales del Ecuador: Las regiones y paisajes del Ecuador. CEDIG-IPGH-IRD. Quito.

USO DEL SUELO —EN EL ECUADOR—

Darwin Sánchez, Ministerio de Agricultura: darwin.sanchez.rodriguez@gmail.com

Julio Moreno, Instituto Geográfico Militar: vjmi76.jm@gmail.com

José Espinosa, Consultor: jepinosa@fragaria.com.ec

RESUMEN

El cambio del uso del suelo hacia manejo agropecuario en Ecuador ha sido dramático en las últimas décadas ampliando la frontera agrícola a tal punto que se han agotado las posibilidades de acceder a buena tierra y ha promovido la utilización de tierras marginales y páramos con el consecuente riesgo ambiental. La diversidad de suelos y ambientes del país hacen posible la producción de una gran variedad de cultivos, viables solamente por los cambios en temperatura y precipitaciones resultantes de la presencia de la cordillera de los Andes en el trópico. Los cambios en la superficie sembrada con estos cultivos han sido frecuentes, con incrementos constantes, ya sea por reemplazo de unos cultivos por otros, dependiendo del precio en el mercado o por los cambios forzados por problemas fitosanitarios. La superficie dedicada a manejo agrícola en el año 1954 era de 1.77 millones de hectáreas, área que en el 2013 creció a 2.47 millones de hectáreas. La presión sobre la tierra para producir los alimentos de consumo interno y generar productos exportables, junto con el crecimiento poblacional, han expandido significativamente la frontera agrícola en todo el país, de modo que al momento el área total de tierras parcial o totalmente intervenidas con usos productivos y extractivos asciende al 29 % del territorio nacional continental, correspondientes a aproximadamente 7.33 millones de hectáreas, de las cuales 5.11 millones están bajo manejo agropecuario. Los proyectos “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional”, escala 1: 25 000, y “Levantamiento de Cartografía Temática a escala 1: 25 000”, promovidos por el gobierno nacional, generaron la información básica que permitió desarrollar los mapas de cobertura y uso de la tierra, de aptitudes agrícolas y de conflictos de uso de la tierra que brindan los insumos necesarios para establecer programas gubernamentales tendientes a fortalecer el sector agropecuario, estableciendo un nuevo modelo de manejo que involucre acciones de conservación, uso racional de los recursos naturales e iniciativas para contrarrestar los efectos del cambio climático.

ABSTRACT

The change in soil use toward agriculture and livestock management in Ecuador has been dramatic in the last decades expanding the agricultural frontier to a point that the possibilities to gain access to good agricultural land have run out and have promoted the utilization of marginal land and paramos with the consequent environmental risk. The diversity of soils and environments of the country make it possible the production of an ample variety of crops, viable only for the changes in temperature and rainfall resulting from the presence of Los Andes in the tropics. The changes in the planted area of these crops have been frequent with constant increments either for replacement of some crops for others, depending on market price or for the changes forced by phytosanitary problems. The area under agricultural and livestock management in 1954 was of 1.77 million hectares, which in 2013 increased to 2.47 million hectares. The pressure on the land to produce food for internal consumption and to generate exportable products, in conjunction with the population growth, have significantly expanded the agricultural and livestock frontier of the whole country and, as a result, the land area partial or totally intervened with productive and extractive uses cover 29 % of the national territory, area corresponding approximately to 7.33 million hectares, from which 5.11 million hectares are under agriculture and livestock management. The projects “Generation of Geoinformation for Territorial Management at National Level”, at a 1 : 25 000 scale, and “National Cartographic Survey at 1 : 25 000 scale”, financed by the national government, generated the basic information to develop the maps of land use and cover, agricultural aptitudes, and conflicts in land use which are needed to develop the government programs aimed to strengthen the agricultural and livestock sector, establishing a new management model which includes conservation measures, rational use of natural resources and initiatives to counteract climate change.

6.1. Situación de la tenencia de la tierra en el Ecuador

Después de la independencia del Ecuador, los grandes poseedores de tierra no permitieron que se formularan normativas que afecten la tenencia de los latifundios, quedando la situación de posesión en las mismas condiciones de la colonia. Solamente en 1908, en medio del movimiento liberal de Alfaro, se hace el primer intento de cambio en la tenencia de la tierra con la promulgación de la Ley de Beneficencia que finalmente afecta los latifundios de las órdenes religiosas. Sin embargo, a inicios la década de 1960, la acción de varios movimientos sociales desde el sector campesino, que buscaban acceso a la tierra, y desde el mismo sector terrateniente, que buscaba modernizar la actividad agrícola, hacen que el Estado contemple la posibilidad de formular una ley que reestructure la situación de tenencia de la tierra en Ecuador. Bajo estas circunstancias, en 1964, el Estado promulga la Ley de Reforma Agraria y Colonización, basándose en los principios propuestos en la reunión de la OEA en Punta del Este, Uruguay, en 1961. Estos principios fueron muy parecidos a los que proponía el programa denominado Alianza para el Progreso, promovido por el gobierno de los Estados Unidos, como solución para los problemas de tierra de América Latina. La nueva ley planteaba, entre sus puntos principales, eliminar las formas precarias de producción (mano de obra gratuita conocida como el huasipungo), parcelar las haciendas del Estado y pasarlas a manos de los campesinos e impulsar el proceso de incorporación de nuevas tierras a la actividad agrícola por medio de la colonización (Brassel, *et al.*, 2008).

Los mismos autores indican que, en ese momento, el efecto principal de la promulgación de la ley sería el de mitigar la acción de los movimientos sociales, al mismo tiempo que promovía la modernización de la actividad agrícola. Sin embargo, la denominada lucha por la tierra solamente se dinamizó y es en este periodo donde aparecen organizaciones campesinas como la Federación Nacional de Organizaciones Campesinas (FENOC) y la Ecuador Runakunapak Rikcharimuy (ECUARUNARI), que propusieron una agenda muy activa bajo el lema de “la tierra para quien la trabaja”. Por otro lado, desde el Estado se consideraba que la reforma agraria no solo debía satisfacer la necesidad de justicia social, sino que, fundamentalmente, debía ser una de las columnas que sostenga el proceso de industrialización del país para substituir las importaciones. Se consideraba que la reforma agraria mejoraría los ingresos campesinos y que los haría consumidores de productos industrializados y así se potenciaría la producción del agro, presionando a los medianos y grandes productores a convertirse en empresarios agrícolas. Esta concepción es la que se plasma en la nueva Ley de Reforma Agraria promulgada en 1973 por el gobierno del general Rodríguez Lara.

La presión sobre la tenencia de la tierra continuó durante la década de 1970 por parte de los campesinos, pero particularmente por parte de los latifundistas que consideraban que las leyes promulgadas atentaban contra sus intereses porque la consideraban de carácter confiscatorio. En 1979, la presión de los latifundistas promueve la aprobación de la Ley de Fomento y Desarrollo Agropecuario que garantizaba la seguridad de la tierra eficientemente trabajada, con el espíritu de promover el desarrollo empresarial de medianos y grandes productores. Esta nueva ley no satisfizo las aspiraciones de los terratenientes que sugirieron cambios a la normativa que se plasmaron en la ley de Desarrollo Agrario aprobada en 1994 por el gobierno de Sixto Durán Ballén. Esta nueva ley agraria deroga las normativas de la Ley de Reforma Agraria, eliminando las restricciones a la venta de las propiedades rurales y la tenencia de la mediana y gran propiedad que pasa a estar garantizada por el Estado y permite, además, que las tierras comunales puedan fraccionarse y venderse (Brassel, *et al.*, 2008).

Analizando el efecto de las leyes que afectaron la tenencia de la tierra en Ecuador se puede concluir diciendo que éstas transformaron las grandes haciendas en unidades de producción, pero, además, promovieron también el acceso a la tierra de un alto número de personas, situación que promovió el minifundio en extensas áreas de tierra. Los datos estadísticos del periodo de 1964 a 1994 indican que la superficie total intervenida por la Reforma Agraria fue de 9 026 km² (\approx 900 000 ha), es decir, el 3.4 % de la superficie total del país. Esta superficie es baja si se compara con el efecto de la colonización, promovida también por la Ley de Reforma Agraria, que incorporó 63 631 km² (6.36 millones de ha) a las actividades agrícolas, es decir, el 23 % del territorio nacional (Gondard y Mazurek, 2001).

A pesar de estos cambios, la estructura básica de la tenencia de la tierra no ha variado significativamente en los últimos 50 años, como lo demuestran los datos de los censos de 1954, 1974 y 2000 presentados en el **Cuadro 6.1**. Estos datos indican que ha existido un incremento en el número de predios de 138 % y que la superficie agrícola se ha expandido en 106 %, sin embargo, estos cambios no han afectado en forma importante la tenencia de la tierra, caracterizada por mucha tierra en manos de pocos grandes propietarios. En efecto, los datos del censo agropecuario de 1954 indican que el 71.1 % de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA's) con menos de 5 ha cubrían solamente el 7.2 % de la superficie cultivada y que las propiedades con más de 100 ha cubrían el 64.4 % de la superficie del territorio nacional ocupado por las UPA's. A pesar del incremento significativo en la superficie del territorio nacional bajo uso agropecuario (5.99 millones de ha en 1954 a 12.35 en el año 2000), en general, la situación en el año 2000 es bastante parecida en términos porcentuales al año 1954, donde las propiedades con menos de 5 ha representaban el 63.5 % del total de UPA's, pero ocupaban solamente el 6.3 % de la tierra bajo uso agropecuario, mientras que las UPA's de más de 100 ha representaban solo el 2.3 %, pero concentraban el 42.6 % de la tierra bajo uso agropecuario. La concentración de tierra en pocas manos es mayor en la Sierra, particularmente en las provincias de Azuay, Cañar, Chimborazo, Tungurahua y Cotopaxi, mientras que las provincias de Los Ríos y Guayas son la de mayor concentración de tierra en la Costa (Brassel, *et al.*, 2008; Carrión y Herrera, 2012).

A pesar de que la estructura de la tenencia de la tierra en Ecuador ha permanecido relativamente estable a través de los años, es importante indicar que la actual tendencia en la propiedad de la tierra difiere de la concentración basada en latifundio prevalente hasta los años 50 que se caracterizó por el uso ineficiente de grandes extensiones de tierras de cultivo bajo un sistema patrimonial y autoritario. Con el paso de los años, muchos medianos y grandes propietarios se localizaron en las mejores tierras agrícolas fortalecidos también por una mejor capacidad empresarial que favorece la reconversión productiva mediante la tecnificación y la especialización de las actividades agropecuarias (Jara y Chiriboga, 1984).

Existen todavía algunas grandes propiedades sin transformación productiva como las que se pueden encontrar en el cantón Chunchi, en Chimborazo, o en los páramos de Urcuquí y Cotacachi, en Imbabura, donde persiste el latifundio dedicado a la ganadería extensiva. Por otro lado, ejemplos de permanencia de mediana propiedad con transformación productiva se pueden encontrar en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, en Pichincha, y en el valle del Cutuchi, en Cotopaxi, donde antiguas haciendas ganaderas se han convertido en agro empresas florícolas y de producción de vegetales para exportación.

En la Costa, particularmente, en las provincias de Guayas, Los Ríos y El Oro, el mecanismo de concentración de la propiedad agraria de las últimas décadas ha sido la compra, por parte de grupos empresariales dedicados a la agroexportación, de propiedades de diferente extensión (0.5 a 5 ha) a los campesinos, estableciendo la figura de la multipropiedad que permite que las empresas tengan una o varias propiedades extensas y un conjunto de propiedades anexas, en ocasiones geográficamente dispersas. Además, las concesiones mineras, hidrocarburíferas, madereras, etc., otorgadas por el Estado al sector privado en casi todo el país han permitido la concentración de extensas áreas de tierra donde las actividades agropecuarias pasan a segundo o tercer plano (Brassel, *et al.*, 2008; Carrión y Herrera, 2012).

Finalmente, como consecuencia de la estructura de la tenencia de la tierra desarrollada de los últimos 60 años, se ha conformado en la economía nacional un gran grupo de propietarios de predios pequeños, ubicados generalmente en las tierras menos favorecidas, que han forjado un sector de la economía denominado agricultura familiar asociada a términos como agricultura campesina, pequeña agricultura o agricultura de subsistencia. Este modelo mantiene su racionalidad productiva asociada al uso de la fuerza familiar de trabajo, pero no se sostiene en el tiempo exclusivamente de lo generado de la producción agrícola, sino que depende de los ingresos obtenidos fuera de la finca en prestación de mano de obra en propiedades grandes o en los servicios. A pesar de las restricciones que ofrece este sistema de producción en pequeñas propiedades, la agricultura campesina no solo que produce para el autoconsumo, sino que además produce para cubrir las necesidades del mercado interno y es un motor para la conservación de la agrodiversidad y del ambiente, y es una herramienta importante para la revitalizar la economía y para luchar contra pobreza (Brassel, *et al.*, 2008; Berry y North, 2011; Carrión y Herrera, 2012; Nieto y Vicuña, 2015).

Cuadro 6.1. Descripción de la tenencia de la tierra según los censos de 1954, 1975 y 2000 (adaptado de Brassel, *et al.* (2008)).

Superficie de las UPA's (ha)	Número de propiedades			Porcentaje del total		
	Censo 1954	Censo 1975	Censo 2000	Censo 1954	Censo 1975	Censo 2000
< 5	251 686	346 877	535 309	71.1	66.8	63.5
5 – 20	67 650	96 360	176 726	19.1	18.6	21.0
20 – 100	27 742	64 813	111 290	7.8	12.5	13.2
> 100	7 156	11 091	19 557	2.0	2.1	2.3
Total	354 234	519 141	842 882	100	100	100

Superficie de las UPA's (ha)	Número de propiedades			Porcentaje del total		
	Censo 1954	Censo 1975	Censo 2000	Censo 1954	Censo 1975	Censo 2000
< 5	432 220	538 700	774 225	7.2	6.8	6.3
5 – 20	565 800	935 300	1 706 794	9.4	11.8	13.8
20 – 100	1 138 700	2 664 700	4 614 436	19.0	33.5	37.3
> 100	3 863 000	3 810 800	5 260 375	64.4	47.9	42.6
Total	5 999 700	7 949 500	12 355 830	100	100	100

6.2. Uso agrícola de los suelos del Ecuador

Dada la existencia de pisos climáticos altitudinales y la heterogeneidad de los suelos (propiedades físicas, químicas y biológicas), el potencial agrícola de los suelos de Ecuador varía desde áreas que pueden usarse en forma intensiva hasta zonas que no deben ser utilizadas para producción agrícola. El crecimiento poblacional y la consecuente presión sobre la tierra, para producir los alimentos de consumo interno y generar productos exportables, han expandido significativamente la frontera agrícola en todo el país. En la década de 1990, alrededor de dos terceras partes del país estaban cubiertas por vegetación natural, pero la Costa ya había perdido alrededor del 75 % de su cobertura natural en áreas que se despejaron para cultivos de ciclo corto, pero, particularmente, para plantaciones de cultivos permanentes. En la Amazonía solo el 2 % de la tierra se utilizaba para cultivos de ciclo corto, cultivos permanentes o pastos y en la Sierra los cultivos anuales cubrían la mitad del área con potencial productivo (Huttel, *et al.*, 1999). En el año 2019, la superficie de suelo en diferentes usos fue de 12.3 millones de hectáreas, 0.5 % más que la superficie del 2018. De este total, 7.2 millones de hectáreas no son de uso agropecuario (montes, bosques, páramos, descanso y otros usos no agropecuarios) y 5.1 millones de hectáreas se encuentran bajo manejo agropecuario (cultivos permanentes y transitorios, así como pastos cultivados y naturales) (INEC, 2020).

El cambio del uso del suelo hacia manejo agropecuario ha sido dramático en las últimas tres décadas. Se considera que la superficie dedicada a manejo agrícola en el año 1954 era de 1.77 millones de hectáreas (Huttel, *et al.*, 1999), área que en el 2013 se incrementó a 2.47 millones y que en el 2019 alcanzó la cifra de 5.1 millones de ha (INEC, 2013; INEC, 2020). De esta superficie, el área de mayor ocupación corresponde a pastos cultivados con el 39 % (Costa 53.5 %, Sierra 27 % y Amazonía 17 %), seguida de los cultivos permanentes con el 28 % (Costa 72 %, Sierra 17.5 % y Amazonía 10 %), cultivos transitorios con el 15 % (Costa con 68 %, Sierra 29 % y Amazonía con 3 %) y los pastos naturales con el 18 % (Sierra 66 %, Costa 24 % y Amazonía 11 %) (INEC, 2020). Estos datos demuestran la clara tendencia a la ampliación de la frontera agrícola en Ecuador, que ha agotado la posibilidad de acceder a buena tierra, abriendo el camino para que se utilicen tierras marginales y páramos con el consecuente riesgo ambiental (FLACSO, *et al.*, 2008; IGM, 2013; Jarrín, *et al.*, 2017).

La diversidad de suelos y ambientes del país hacen posible la producción de una gran variedad de cultivos, viables solamente por los cambios en temperatura y precipitaciones resultantes de la presencia de la cordillera de los Andes en el trópico. Los cambios en superficie de estos cultivos han sido frecuentes, con incrementos constantes en la mayoría de los casos por reemplazo con otros cultivos dependiendo del precio en el mercado o de los cambios forzados por problemas fitosanitarios. La descripción de los cultivos y sus zonas de distribución demuestran las características particulares del uso del suelo para explotación agrícola en el país.

6.2.1. Principales cultivos de la Costa

Los principales cultivos de ciclo corto de la Costa son arroz y maíz, utilizados como alimento básico para la población y para alimentación animal, respectivamente. Los principales cultivos perennes son banano, palma aceitera, cacao, café y caña de azúcar sembrados en áreas extensivas de la región. La descripción y distribución de estos cultivos, y de otros de interés, se presentan a continuación.

Arroz (*Oriza sativa* L.)

Este cultivo alcanzó a cubrir 188 000 ha en el año 1991 (Huttel, *et al.*, 1999), cifra que toma en cuenta los dos ciclos de producción al año obtenidos en esa época. En el año 2010, el Ecuador cosechó 393 137 ha de arroz, mientras que en el año 2019 la superficie fue de 257 273 ha, localizadas, principalmente, en las provincias de Guayas y Los Ríos (INEC, 2020). En la **Figura 6.1** se presenta la distribución de las zonas productoras de arroz en el año 2019 que se ubican, principalmente, en suelos de textura arcillosa con buena retención de agua.

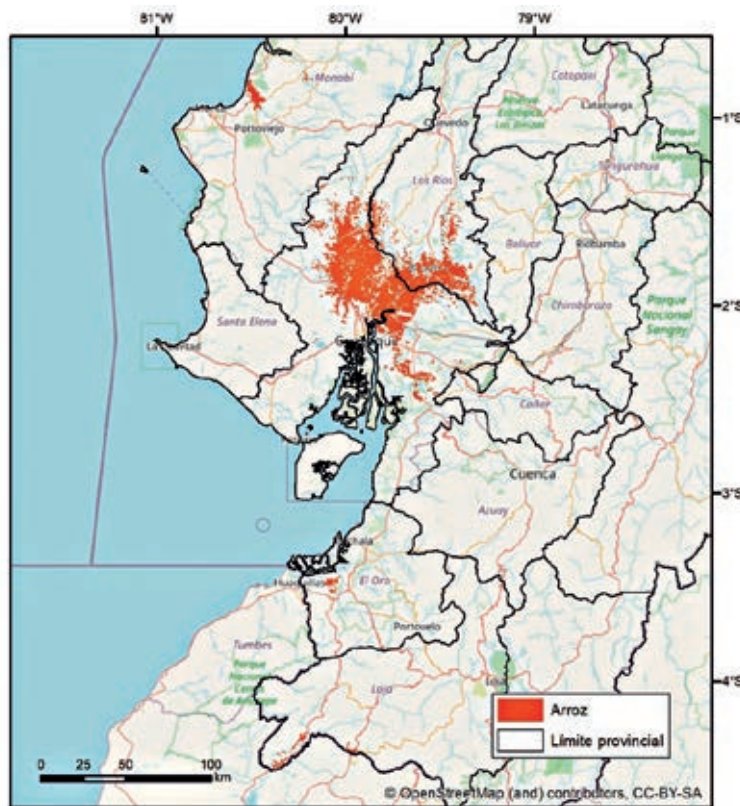


Figura 6.1. Distribución de la superficie sembrada con arroz en Ecuador durante el segundo periodo de siembra del año 2019. Adaptado de MAG (2020b).

Maíz duro (*Zea mays* L.)

Este cultivo, destinado principalmente para la alimentación animal, se ubica en el piso bajo y cálido del país. En 1992 el cultivo de maíz duro ocupó una superficie de 315 000 ha (Huttel, *et al.*, 1999), en el 2010 se cosecharon 440 346 ha, mientras que en el año 2019 fueron 322 846 ha, con el 85 % de la superficie total concentrada en las provincias de Los Ríos, Guayas y Manabí (FAO, 2020; INEC, 2020). El maíz necesita suelos ricos y suficiente agua a lo largo de todo su ciclo vegetativo, especialmente en la época de floración. La distribución del cultivo de maíz duro en Ecuador en el año 2019 se presenta en la **Figura 6.2**.

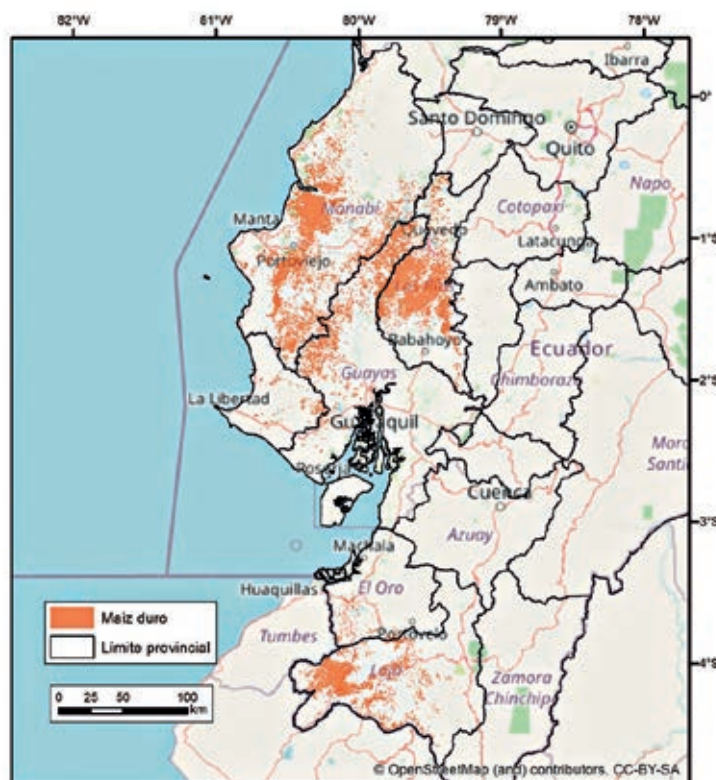


Figura 6.2. Distribución de la superficie sembrada con maíz duro en Ecuador durante el primer periodo de siembra del año 2019. Adaptado de MAG (2020b).

Soya (*Glycine max* L. Merrill)

La soya se introdujo en el año de 1971 para abastecer la demanda de aceite comestible del país. En el año 1992 la superficie sembrada con soya fue de 120 000 ha (Huttel, *et al.*, 1999), reduciéndose paulatinamente durante los últimos años debido a que los agricultores no han podido competir con la producción de soya de otros países que ofertan grano a menor precio en el mercado internacional. En el año 2010 se cosecharon 43 000 ha de soya y en el año 2019 solamente 27 020 ha (FAO, 2020), ubicadas en las provincias de Guayas y Los Ríos (**Figura 6.3**). La soya se produce bien en suelos de origen volcánico o en aquellos provenientes de aluviones recientes. Este cultivo exige mucha agua (aunque no soporta el exceso) y altas temperaturas.

homogéneos, profundos, de textura franca, ricos en potasio y nitrógeno y con alta disponibilidad de agua. Se desarrolla en zonas con lluvias que varían entre 120 y 150 mm/mes o en zonas bajo riego. El banano tolera insolaciones muy variadas, pero la demanda de agua se incrementa con el número de horas de sol por año. La distribución del cultivo de banano en Ecuador en el año 2019 se presenta en la **Figura 6.4**.

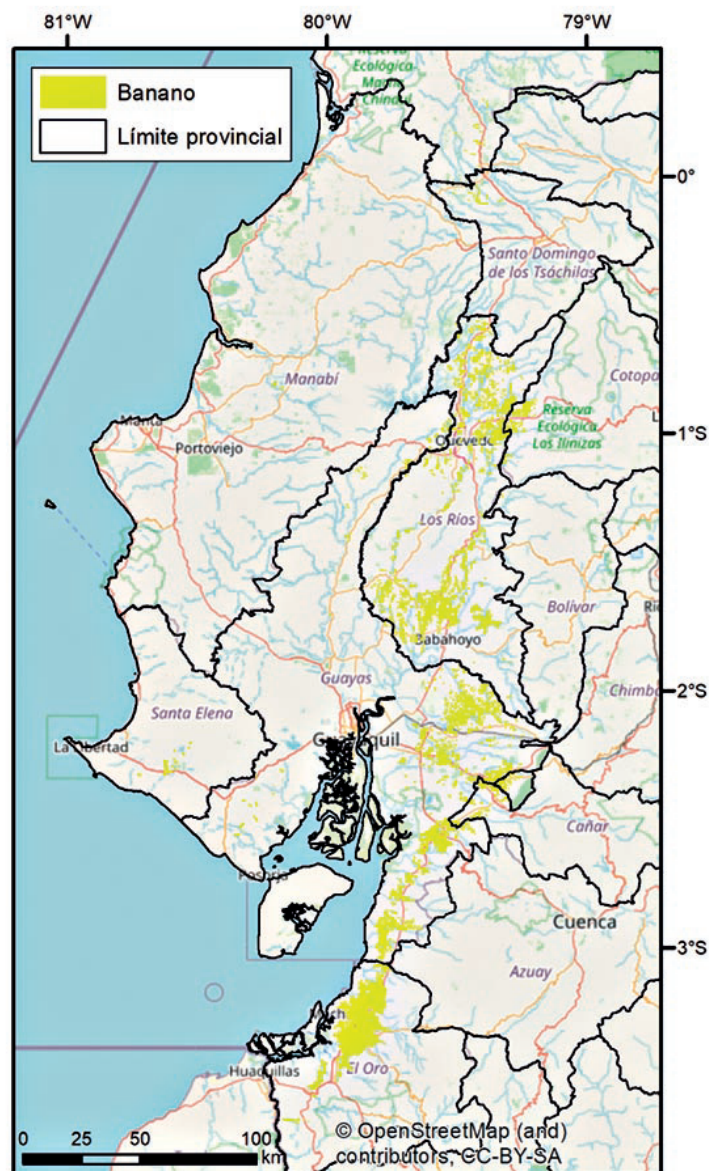


Figura 6.4. Distribución de la superficie plantada con banano en Ecuador en el año 2019. Adaptado de MAG (2020b).

Palma aceitera

El área sembrada con palma aceitera incluye a la especie africana *Elaeis guineensis* y al híbrido inter-específico O x G resultado de la combinación de la palma nativa o americana (*Elaeis oleífera*) con la palma africana (*E. guineensis*). La palma aceitera se cultiva en el Ecuador desde la década de 1950 cuando apareció como cultivo pionero en las zonas de colonización de las áreas tropicales de la provincia de Pichincha (hoy provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas) y que luego se expandió hacia el norte y sur en la Costa y al norte de la Amazonía, llegando a cubrir una superficie de aproximadamente 280 000 ha en el año 2014

(ANCUPA, 2014). Los problemas sanitarios, principalmente la pudrición del cogollo en el material *guineensis*, han reducido constantemente la superficie cosechada, que en el año 2019 fue de 200 908 ha (INEC, 2020). En general, la palma aceitera no es exigente en suelo, pero se desarrolla mejor en suelos de textura franco, franco-arcilloso y franco-limoso, que permiten un drenaje apropiado. Es un cultivo que demanda altas temperaturas, con el mejor rango comprendido entre 26 y 29 °C. Exige también abundante agua (2 000 y 2 500 mm/año, distribuidos uniformemente) y suficientes horas luz (1 000 o más horas/luz/ año). La distribución del cultivo de palma aceitera en Ecuador se presenta en la **Figura 6.5**.

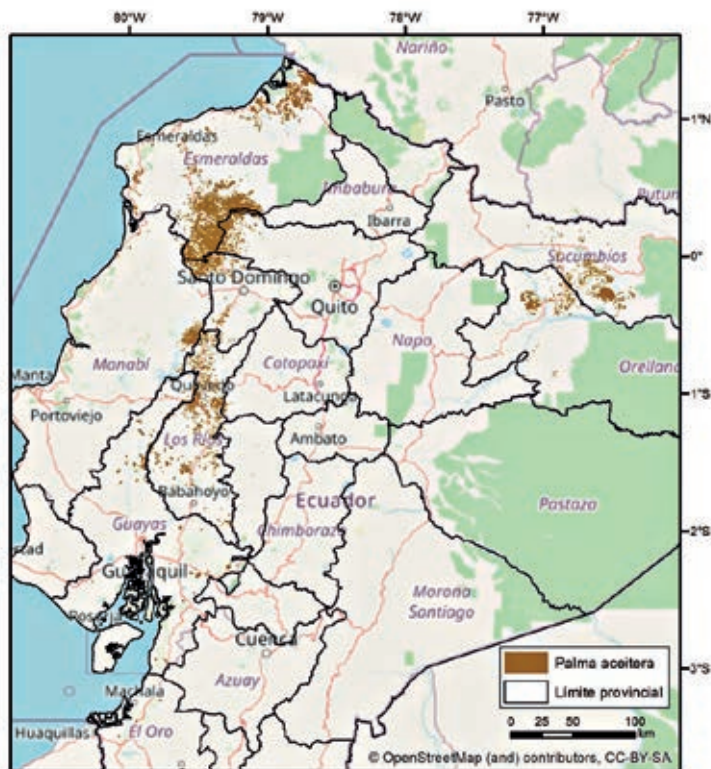


Figura 6.5. Distribución de la superficie plantada del cultivo de palma aceitera en Ecuador en el año 2019. Adaptado de MAG (2020b).

Cacao (*Theobroma cacao* L.)

Este es también un cultivo emblemático de la Costa ecuatoriana que produjo una recordada bonanza económica en la región a inicios del siglo XX. La prosperidad económica provocada por el comercio de cacao en esa época se debió a la liberación del comercio de los productos locales de obligación de tránsito por Callao o España durante la colonia y a la independencia de Guayaquil, condiciones que incentivaron el uso de nuevas tierras para la producción de cultivos perennes como el cacao, cuya exportación se incrementó significativamente pasando de 5 000 toneladas en 1855 a 20 000 en 1900 y a 47 000 en 1914. La infestación de las plantaciones con la escoba de bruja (*Crinipellis perniciososa*) y la Monilia (*Moniliophthora roreri*), a principios del siglo XX, afectó paulatinamente las plantaciones provocando una marcada reducción en producción que llevó a una crisis económica y política nacional por su importancia como fuente de divisas (ANECACAO, 2021; CAMAREN, 2021).

El cacao fue el principal motor económico del país hasta los años 1940, época en la que el banano pasó a ser el principal impulsor de la economía. En el año 1999 el cultivo del cacao cubría una superficie de alrededor de 300 000 ha (Huttel, *et al.*, 1999), pero, en su mayoría, eran plantaciones descuidadas que habían perdido importancia luego de la caída de la producción y los precios de la década de 1920. En el año 2010 se cosechó cacao en 360 025 ha, una buena parte en plantaciones rehabilitadas para aumentar la producción que con el

incremento internacional de los precios ha vuelto a ser un importante motor de la economía nacional. En el año 2019 la superficie cosechada de cacao se incrementó alcanzando las 525 435 ha (FAO, 2020), crecimiento que se debe a la incorporación de nuevas áreas al cultivo en la Costa y la Amazonía y al reemplazo con cacao en áreas antes cultivadas con palma aceitera y banano. El cacao demanda suelos bien drenados y fértiles, clima cálido con temperaturas mínimas absolutas superiores a 10 °C y lluvias entre 1 250 - 1 500 mm, pero puede soportar períodos secos si no son intensos o prolongados. La distribución del cultivo de cacao en Ecuador se presenta en la **Figura 6.6**.

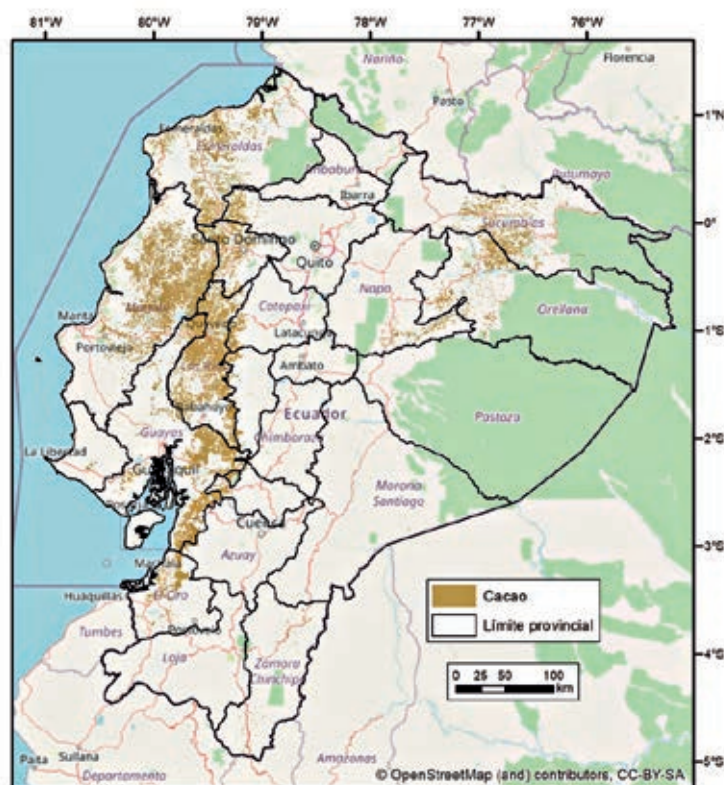


Figura 6.6. Distribución de la superficie plantada del cultivo de cacao en Ecuador en el año 2015. Adaptado de IGM (2020).

Café (*Coffea* sp.)

Se cultiva en el Ecuador desde el siglo XVIII. En 1999 el cultivo de café alcanzó a cubrir una superficie de 400 000 ha (Huttel, *et al.*, 1999), en su mayoría con la variedad Robusta sembrada entre el bosque tropical con poco uso de tecnología. La información oficial del año 2012 indica que en Ecuador se cosecharon alrededor de 149 000 ha de café (PROECUADOR, 2013), incluyendo áreas bien manejadas de Robusta y Arábica que incrementaron sustancialmente el producto disponible para exportación. Los cafetales de Robusta alojados en el bosque tropical han ido perdiendo importancia, pero se han afianzado las áreas de café manejado con tecnología dando lugar a la cosecha y exportación de café de calidad. En el año 2019 se cosecharon 36 047 ha (FAO, 2020), localizadas, principalmente, en las provincias de Manabí, El Oro, Loja, Sucumbios, Orellana y Zamora Chinchipe (**Figura 6.7**). El café no es muy exigente en fertilidad y se desarrolla adecuadamente tanto en suelos fértiles como pobres y aun en suelos ácidos. Las exigencias climáticas varían según la especie, por ejemplo, la Arábica, originaria del este de África, se cultiva en altitudes entre los 1 300 y 2 000 m s. n. m., con precipitaciones que varían de 1 500 a 1 800 mm y temperaturas de 20 a 25 °C. La especie variedad Robusta, originaria de las llanuras forestales húmedas del África, demanda lluvias > 1 500 mm, temperaturas entre 22 y 26 °C y una estación seca no mayor a 2 meses.

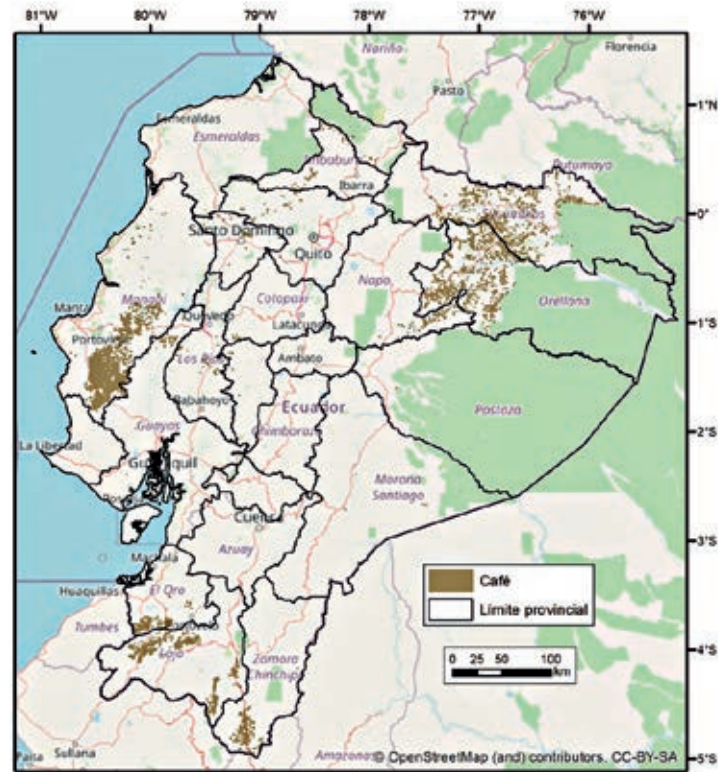


Figura 6.7. Distribución de la superficie sembrada con café en Ecuador en el año 2015. Adaptado de IGM (2020).

Caña de azúcar (*Saccharum* sp.)

El cultivo de la caña de azúcar se introdujo en Ecuador a inicios del siglo XVI. Se cultiva a gran escala en la Costa ecuatoriana desde hace aproximadamente un siglo, lo que ha promovido el desarrollo paralelo de grandes complejos agroindustriales. Las áreas de mayor siembra se encuentran localizadas en la provincia del Guayas, pero también se siembra en pequeñas áreas en los valles cálidos interandinos. En el año 2010 se reportaron 106 928 ha de caña de azúcar en el país, mientras que en el año 2019 se cosecharon 121 812 ha (FAO, 2020; INEC, 2020). Parte de este incremento fue estimulado por el proyecto de utilización de caña para fabricar biocombustible. La caña de azúcar prefiere suelos friables, aunque tolera diferentes condiciones siempre y cuando los suelos sean profundos, bien drenados y ricos en materia orgánica. La caña requiere de un clima cálido y húmedo, con 100-120 mm de lluvias por mes durante la fase de crecimiento, cantidad que debe ser suplida con riego en las zonas secas. La intensa insolación favorece la acumulación de azúcar en los tallos y, por lo tanto, la producción. La distribución del cultivo en el país se presenta en la **Figura 6.8**.

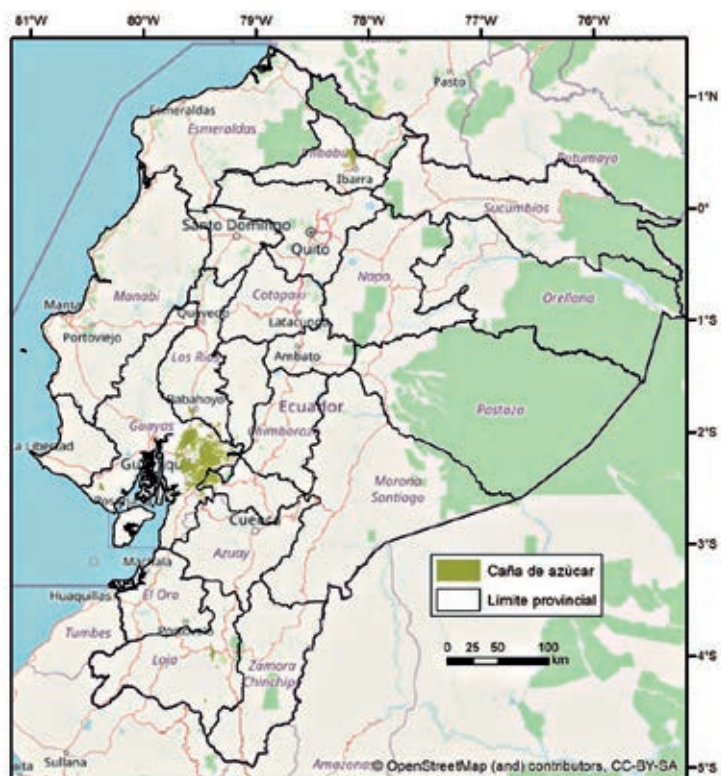


Figura 6.8. Distribución de superficie plantada con caña de azúcar industrial en Ecuador en el año 2019. Adaptado de MAG (2020b).

Plátano (*Musa paradisiaca*) (genoma AAB)

El plátano es uno de los alimentos básicos de la población de la Costa y de la Amazonía, pero se consume también en la Sierra. Con esta fruta se preparan una variedad de platillos apreciados en todo el país. Ciertas zonas producen excedentes que se exportan, principalmente, a los mercados de Estados Unidos. En el 2010 se reportaron 113 135 ha cosechadas de plátano y en el año 2019 la superficie fue de 135 813 ha (FAO, 2020).

Piña (*Ananas sativus* Schules f.; *Ananas comosus* L.)

Tradicionalmente, la piña fue un cultivo de zonas relativamente secas de la cuenca del Guayas (en especial en la región de Milagro), al igual que en la provincia del El Oro (Huttel, *et al.*, 1999). Sin embargo, a partir de 1980 el cultivo se extendió a la región más húmeda, particularmente a la zona de Santo Domingo de los Tsáchilas, donde, pese a la limitada insolación, se encuentran las mayores y más tecnificadas plantaciones. En el año 2010 se cosecharon 7 000 ha de este cultivo, pero en el 2019 solamente se reportaron 4 047 ha (FAO, 2020).

Mango (*Mangifera indica* L.)

Sembrado históricamente en las zonas secas de las provincias de Guayas y Manabí, este cultivo llegó a ocupar una superficie de 2 700 ha en 1991 con variedades locales y materiales mejorados destinados a la exportación (ej. Tommy Atkins) (Huttel, *et al.*, 1999). El crecimiento de las plantaciones tecnificadas para cultivar variedades de exportación ha sido significativo. En el año 2010 en Ecuador se cosecharon 20 323 ha de esta fruta tropical, mientras que en 2019 fueron 15 981 ha (FAO, 2020).

Caucho (*Hevea brasiliensis* N.)

El caucho se cultiva en la Costa ecuatoriana desde la primera mitad del siglo XX (Patiño, 1967; Huttel, *et al.*, 1999). El área se ha incrementado paulatinamente en los últimos años debido al renovado interés en el caucho natural para diferentes usos. En el año 2010 se reportó la existencia de 10 866 ha utilizadas para producir látex natural y en el año 2019 la superficie fue de 14 507 ha (FAO, 2020). Este cultivo necesita suelos profundos y bien drenados, requiere de clima cálido y húmedo con fuerte insolación, con un mínimo de lluvias anuales de 1 500 mm distribuidas en forma uniforme durante el año. La producción puede afectarse cuando se presentan períodos secos.

Abacá (*Musa textiles* N.)

El abacá se cultiva para obtener fibra para elaborar, principalmente, papel resistente al agua. Las plantaciones de abacá se iniciaron en la Costa en la década de 1950, durante el intenso proceso de colonización de la zona húmeda de lo que hoy es la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, llegando a ocupar, en esa época, alrededor de 10 000 ha (Huttel, *et al.*, 1999). En el año 2010 la superficie cosechada con abacá fue de 24 343 ha, mientras que en el año 2019 fue de 29 422 ha (FAO, 2020). Este cultivo demanda suelos bien drenados, relativamente ricos y suficiente lluvia distribuida en todo el año.

6.2.2. Principales cultivos de la Sierra

La agricultura de la Sierra se caracteriza por la producción en pequeñas propiedades, con excepción de ciertas áreas dedicadas a la producción ganadera. Sin embargo, esta producción es importante para satisfacer la demanda interna de alimentos y para preservar la seguridad alimentaria de la población. Los principales cultivos de esta región se describen a continuación.

Maíz suave (*Zea mays* L.)

El maíz que se cultiva en la Sierra crece en el piso altitudinal intermedio, empleando variedades de polinización abierta y grano suave utilizado para alimentación humana. Este es un alimento básico de mucho arraigo y tradición en la población. En 1992, la superficie cultivada con maíz suave para grano seco fue de 187 310 ha y 21 580 ha para mazorca fresca (choclo) (Huttel, *et al.*, 1999). En el año 2010 se cosecharon 67 533 ha de maíz suave para grano y 53 295 ha para choclo, mientras que en el 2019 la superficie de maíz para grano fue de 44 820 ha y 18 439 ha destinadas a choclo (MAG, 2020a). Las variedades de maíz suave que se cultivan en la Sierra producen mejor en suelos francos a franco arenosos ubicados en los valles y las estribaciones bajas de la cordillera.

Papa (*Solanum tuberosum* L.)

Originario de los Andes, la papa es uno de los cultivos más extendidos de la Sierra ecuatoriana y constituye un alimento básico no solamente para los campesinos de los Andes, sino también para la población en general. La producción de este cultivo está, principalmente, en manos de pequeños agricultores (superficies menores a 5 ha) como un cultivo tradicional (Huttel, *et al.*, 1999; Andrade, *et al.*, 2002). La papa se siembra en todas las provincias de la Sierra, pero, especialmente en Carchi, Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi y Pichincha, desde los 2 800 a 3 200 m s. n. m. en el piso frío relativamente húmedo (**Figura 6.9**). A partir del año 2000 las áreas dedicadas al cultivo de papa se han ido reduciendo paulatinamente, así en el año 2010 se cosecharon 44 245 ha de papa y en el año 2019 la superficie cosechada con papa fue de apenas 19 675 ha (FAO, 2020; INEC, 2020). La reducción en superficie se debe, principalmente, a los altos costos de producción, particularmente la fertilización y el control de plagas, de modo que un buen número de pequeños productores no logra compensar con el precio de venta en el mercado los costos de producción, situación que se agrava con la continua oferta de papa de contrabando a menor precio, por esta razón, muchos de estos productores han substituido las áreas de papa con pastos. La papa crece bien en suelos volcánicos negros, ligeramente ácidos y profundos.



Figura 6.9. Distribución de la superficie sembrada con de papa en Ecuador en el año 2015. Adaptado de IGM (2020).

Cebada (*Hordeum vulgare* L.)

La cebada llegó a Ecuador con los conquistadores españoles y fue adoptada por la población campesina que lo incorporó a su dieta (Patiño, 1967). Desde mediados del siglo XX, una alta proporción del grano de cebada se utilizó para la producción de cerveza. Entre 1985 y 1986, la superficie sembrada fue de 68 000 ha, pero esta superficie se ha reducido apreciablemente debido a la disponibilidad de grano importado a menor precio que el producido localmente. En el año 2010 se cosecharon 26 374 ha y solamente 9 198 ha en el año 2019 (FAO, 2020). Las principales zonas de cultivo están localizadas en las provincias de Chimborazo, Cotopaxi, Pichincha, Bolívar e Imbabura. Este cultivo puede adaptarse a condiciones de gran altitud (3 750 - 3 800 m s. n. m.) debido a que soporta el frío y las heladas mientras no esté espigado, sin embargo, es mejor sembrarlo por debajo de los 3 600 m s. n. m. La cebada también se siembra en la zona seca del piso altitudinal intermedio (2 800 - 3 000 m s. n. m.) en zonas con bajas precipitaciones (500-700 mm) y sin riego. También se cultiva en suelos erosionados donde, por lo general, representa la última posibilidad de siembra (Huttel, *et al.*, 1999; Hidrobo, *et al.*, 2015).

Trigo (*Triticum sativum* L.)

La planta de trigo pudo haberse sembrado por primera vez en el Ecuador en la plaza de San Francisco de la ciudad de Quito en 1541 (Patiño, 1967). Aun cuando el uso de harina de trigo para diversos propósitos culinarios, principalmente para la elaboración de pan, es muy arraigado en la población ecuatoriana, la producción local de trigo no ha podido competir con la producción externa y la mayoría del grano consumido es importada. En el año 2010 se cosecharon 8 533 ha de trigo en Ecuador, mientras que la superficie con trigo en el 2019 fue de solamente 3 085 ha (FAO, 2020). Es un cultivo que crece bien a altitudes de 2 200 - 3 100 m s. n. m., aunque también se lo encuentra en sitios más altos (3 300 m s. n. m.).

La producción de trigo se concentra en las provincias de Bolívar, Chimborazo, Imbabura, Pichincha y Carchi, donde existen suelos con buena capacidad de retención de humedad, que no se compactan en época de sequía y que reciben entre 600 y 700 mm de precipitación y 1 050 horas luz al año. El trigo crece en sitios con temperaturas de 5-6 °C, pero puede desarrollarse en áreas con temperaturas de hasta 28 °C.

6.2.3. Principales cultivos de la Amazonía

En la región Amazónica, por sus características de temperatura, precipitación y suelos, se cultivan prácticamente todos los cultivos tropicales encontrados en la Costa ecuatoriana, pero las superficies de cultivo son bajas. Sin embargo, es interesante considerar el incremento del área cultivada con cacao (*Theobroma cacao L.*) que en el año 2004 ocupó 8 500 ha, mientras que en el 2019 el área se incrementó a 27 830 ha (MAG, 2020a), indicando que este cultivo se ha convertido en un rubro económico importante para la región Amazónica de Ecuador.

6.2.4. Bosques y pastos

El siempre verde y denso bosque de los dos grandes macizos selváticos de Ecuador, ubicados en la Costa (Esmeraldas) y en la llanura amazónica (Provincias de Napo y Sucumbíos), han sido por mucho tiempo la fuente de la madera utilizada para la industria, pero con el tiempo la extracción de madera ha causado severo daño ambiental. La zona boscosa de Esmeraldas es importante por sus particulares características, pero la selva Amazónica es mucho más grande y compleja. Además, en las pendientes externas de los Andes también existen bosques donde se explotan especies como el cedro (*Cedrela*) o el romerillo (*Podocarpus*) y en las zonas secas se explotan especies como el guayacán (*Tabebuia* div. sp.) o el beldaco (*Pseudobombax*). Los pastos o praderas para la ganadería bovina se encuentran en todas las condiciones climáticas del país en zonas grandes y homogéneas. Existen pastizales en la región montañosa, en las partes intermedias y bajas de las vertientes externas húmedas y en las áreas bajas y cálidas del país. Sin embargo, es notable el incremento de casi tres veces del área dedicada a pastos naturales y cultivados en el país que pasó de 1.57 millones de ha en el año 1954 a 4.46 en el año 2019 (Pacheco, 2009; INEC, 2020). Se estima que de las 13 millones de hectáreas que conforman la región Amazónica, el área con intervención humana es de 605 052 ha y de éstas 340 843 ha son pastos cultivados, 142 693 ha cultivos permanentes, 23 692 ha de cultivos transitorios y barbecho y 97 824 ha de tierra con pastos naturales (INEC, 2020). Esto representa el 5 % de la superficie de la región Amazónica, área que en la década de los años 1990 era solamente del 2 % (Huttel, *et al.*, 1999). Este cambio demuestra la clara tendencia a la ampliación de la frontera agrícola en Ecuador, que en el periodo entre 1998-2002 pasó de 8 millones a 12.3 millones de hectáreas (FLACSO, *et al.*, 2008).

6.2.5. Cultivos secundarios

Además de los principales cultivos señalados anteriormente, es importante indicar que en Ecuador se cultivan un sinnúmero de cultivos secundarios que crecen gracias a la diversa oferta ambiental de las áreas bajo producción agrícola en el país. Esta diversidad se debe a la variedad de suelos y climas, así como a la larga y desigual evolución del espacio agrícola, es decir, variaciones locales de densidad poblacional que se traducen en zonas prácticamente vacías, ocupadas generalmente por bosques y zonas intensamente pobladas dedicadas a la agricultura. De igual manera, las diferencias entre grandes extensiones (haciendas o plantaciones) y las escasas superficies de los minifundios se traducen en grandes diferencias sociales y económicas basadas en las estructuras de tenencia de la tierra, condiciones que también promueven la diversidad de cultivos secundarios.

Entre los cultivos alimenticios secundarios nativos de los Andes se pueden mencionar al chocho (*Lupinus mutabilis* S.), melloco (*Ullucus tuberosus* H.B.K.), oca (*Oxalis tuberosus* Mol.), quinua (*Chenopodium quinoa* W.) y zanahoria blanca (*Arracacia zanthorrhiza* B.), plantas ricas en minerales y aminoácidos. También son importantes los cultivos de haba (*Vicia faba* L.) y alverja (*Pisum sativum* L.) provenientes

del Asia menor, pero que se han adaptado bien a las tierras altas del país. Parte de la producción de estos cultivos se la destina al consumo familiar, pero un importante remanente va a los mercados locales (Huttel, *et al.*, 1999; Hidalgo, *et al.*, 2011), con excepción de la producción de quinua que en gran parte se exporta a diversos mercados en el mundo (Peralta, 2009; MAG, 2018).

Por otro lado, en Ecuador se cultivan 27 hortalizas y legumbres, sembradas principalmente en pequeñas parcelas en las zonas templadas y frías de la Sierra, ya sea a campo abierto o en invernaderos, 29 especies de frutales en la Sierra, 26 especies de frutales de la zona cálida, 17 especies de otros cultivos secundarios.

Así mismo, en el Ecuador se cultiva 42 especies de flores (rosas, flores de verano y flores o plantas tropicales). Cabe indicar que la producción de flores en la Sierra ecuatoriana se ha incrementado apreciablemente en los últimos años llegando a una superficie de 6 960 ha, la mayoría cultivadas en invernaderos con alta tecnología, donde la rosa concentra en 59 % de la superficie total del suelo utilizado con flores (INEC, 2020).

6.3. Cobertura de la tierra y aptitudes agrícolas

La distribución inequitativa de la tierra y la mala utilización del suelo en Ecuador han fomentado procesos de degradación que no permiten, en la mayoría de los casos, aprovechar los recursos naturales de forma sostenible. El identificar las áreas del territorio nacional que actualmente están desaprovechadas con usos poco intensivos, o aquellas que están sobreexplotadas en comparación con su uso potencial, brinda los insumos necesarios para establecer programas gubernamentales tendientes a fortalecer el sector agropecuario estableciendo un nuevo modelo de manejo que involucre acciones de conservación, uso racional de los recursos naturales e iniciativas para contrarrestar los efectos del cambio climático (Garzón, *et al.*, 2002; Manchego, *et al.*, 2017).

Los proyectos “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional, escala 1: 25 000” (CLIRSEN, *et al.*, 2011) y “Levantamiento de Cartografía Temática a escala 1: 25 000” (SIGTIERRAS, 2015) generaron la información básica que permitió organizar la información para definir, delimitar y cuantificar las áreas donde la cobertura y el uso no corresponden a aquellos definidos por las características establecidas en el sistema de Capacidad de Uso de la Tierras desarrollado para el país. Para lograr esta comparación se reclasificaron las unidades de cobertura de uso de la tierra para relacionar en forma adecuada la información pertinente por uso, temporalidad y cobertura (**Cuadro 6.2**) y se reclasificaron las definiciones de aptitud agrícola, basándose en la habilidad natural de las tierras para producir en forma constante bajo tratamientos continuos y usos específicos. Se utilizó un sistema técnico–interpretativo de los estudios de suelos conducidos por los dos proyectos y con el soporte de información climática y de relieve. De esta forma se logró reasignar a cada unidad de suelo su uso y manejo apropiado (**Cuadro 6.3**). Con esta información se redefinieron las características de las claves para calificar las clases de aptitud agrícola de los suelos (**Cuadro 6.4**). Finalmente, se generaron los mapas de uso de la tierra (**Figura 6.10**) y el de aptitudes agrícolas (**Figura 6.11**) del Ecuador continental. El contraste cuantitativo de la cobertura y uso versus las aptitudes de uso de los suelos que se presenta en la **Figura 6.12** describe claramente la situación actual de la utilización de los suelos en Ecuador.

Cuadro 6.2. Reclasificación de la cobertura en base al uso de la tierra para condiciones de Ecuador (MAG, 2021).

Uso de la tierra	Temporalidad o cobertura
Agrícola	Cultivo anual Cultivo semipermanente Cultivo permanente
Pecuario	Pastos cultivados Pastos con presencia de cultivos de ciclo corto Pastos con presencia de frutales Pastos con presencia de árboles Vegetación herbácea (producción – protección)
Forestal	Plantación forestal (producción – protección)
Conservación y protección	Bosque nativo Páramo Vegetación arbustiva Vegetación herbácea
No aplicable	Área poblada Cuerpo de agua artificial Cuerpo de agua natural Erial Glaciar Infraestructura

Cuadro 6.3. Definición de las clases de aptitud agrícola para condiciones de Ecuador (MAG, 2021).

Cobertura	Descripción	Clase
Cultivo	Cultivos de ciclo corto	C1
	Cultivos de ciclo corto	C2
	Cultivos semipermanentes	C3
	Cultivos permanentes	C4
Pastos	Pastos cultivados	P
	Pastos con saturación de agua gran parte del año	P1
Asociación de pastos con cultivos	Pastos/cultivos	P/C
	Pastos con saturación de agua gran parte del año/cultivos	P1/C
Bosques	Plantación forestal (producción-protección)	B1
	Plantación forestal (conservación-protección)	B2
Sin uso agropecuario		S

Cuadro 6.4. Clases de aptitud agrícola en el Ecuador continental (MAG, 2021).

Clases de aptitud agrícola		
Uso recomendado		Características
Cobertura	Clase	
C (Cultivos)	C1	Agricultura sin y/o con limitaciones ligeras (pedregosidad superficial), suelos profundos, mecanización y riego muy fáciles.
	C2	Agricultura con limitaciones ligeras a moderadas (pedregosidad superficial), suelos moderadamente profundos, mecanización y riego fáciles.
	C3	Agricultura con limitaciones importantes (pendiente, profundidad efectiva, textura superficial, pedregosidad), mecanización y riego de fácil a difícil.
	C4	Agricultura con limitaciones muy importantes (pendiente, profundidad efectiva, textura superficial, pedregosidad, toxicidad, salinidad, fertilidad), mecanización y riego difícil. Se recomiendan medidas de manejo.
P (Pastizales)	P	Zonas marginales para la agricultura por presentar limitaciones importantes. Se recomienda un mejoramiento de pastos existentes.
	P1	Zonas marginales para cultivos, generalmente con saturación de agua gran parte del año.
Asociación de categorías	P/C	Zonas primordialmente aptas para pastos cuyos factores limitantes no afectan al desarrollo del cultivo de arroz. Se recomiendan prácticas sostenibles y adecuadas de manejo.
	P1/C	Idéntico a P/C pero en zonas con saturación de agua gran parte del año.
B (Bosques)	B1	Zonas con limitaciones importantes (pendiente, textura, pedregosidad, fertilidad). Zonas aptas para la producción forestal, por las características de suelos, pendiente y las condiciones climáticas marginales para cultivos.
	B2	Zonas con limitaciones muy importantes (pendiente, profundidad efectiva, textura, pedregosidad, fertilidad, drenaje). Se recomienda la reforestación y/o el mantenimiento de la cobertura natural existente.
Sin uso Agropecuario	S	Suelos sin diferenciación, fuertes pendientes, afloramientos rocosos, zonas marginales para otro tipo de utilización. Se recomienda la reforestación, protección y/o el mantenimiento de la cobertura natural existente.
No aplicable	NA	Áreas pobladas, cuerpos de agua, afloramientos rocosos, áreas en procesos de erosión, áreas erosionadas, áreas salinas, bancos de arena, eriales, flujos de lava recientes, playas, glaciares, nieve y hielo, e infraestructura antrópica.

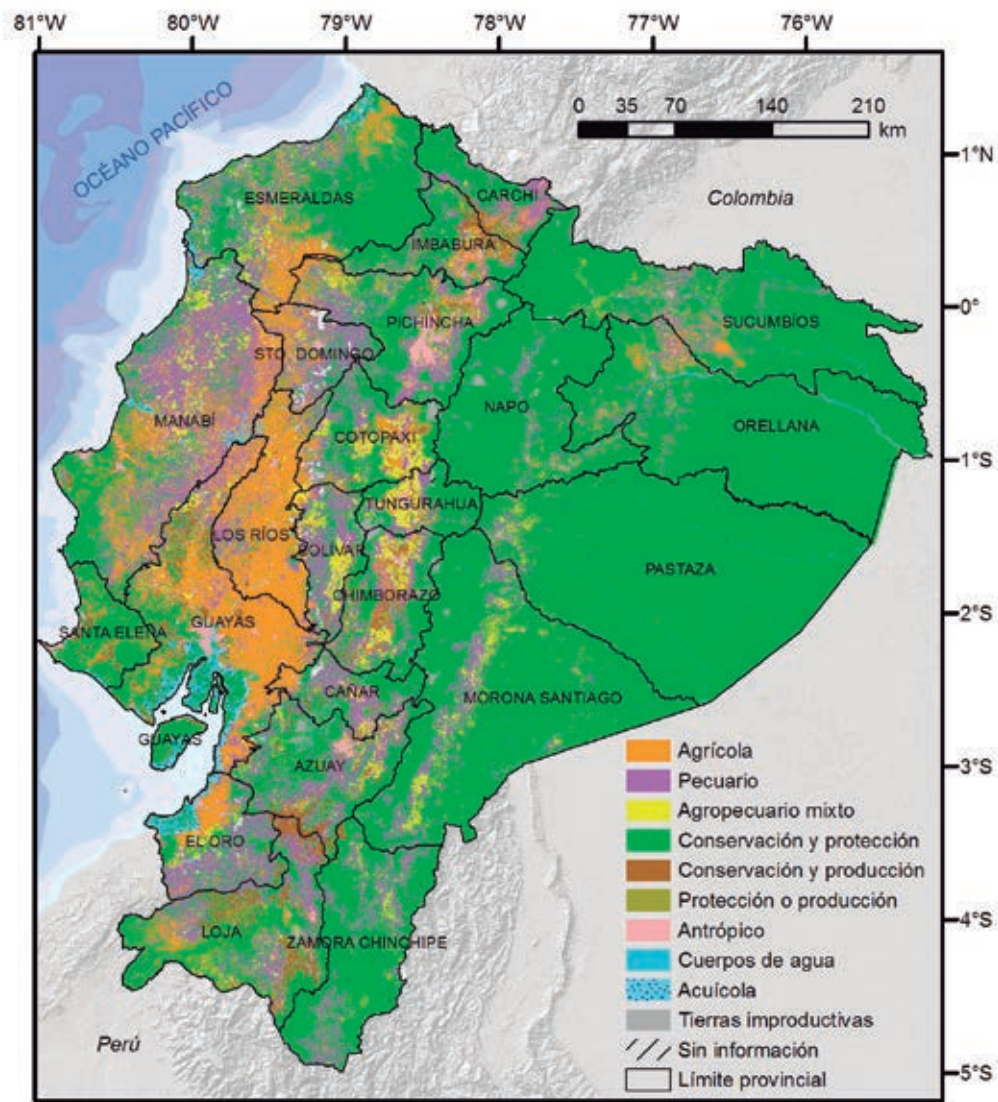


Figura 6.10. Mapa de uso de la tierra del Ecuador continental (MAG, 2020c).

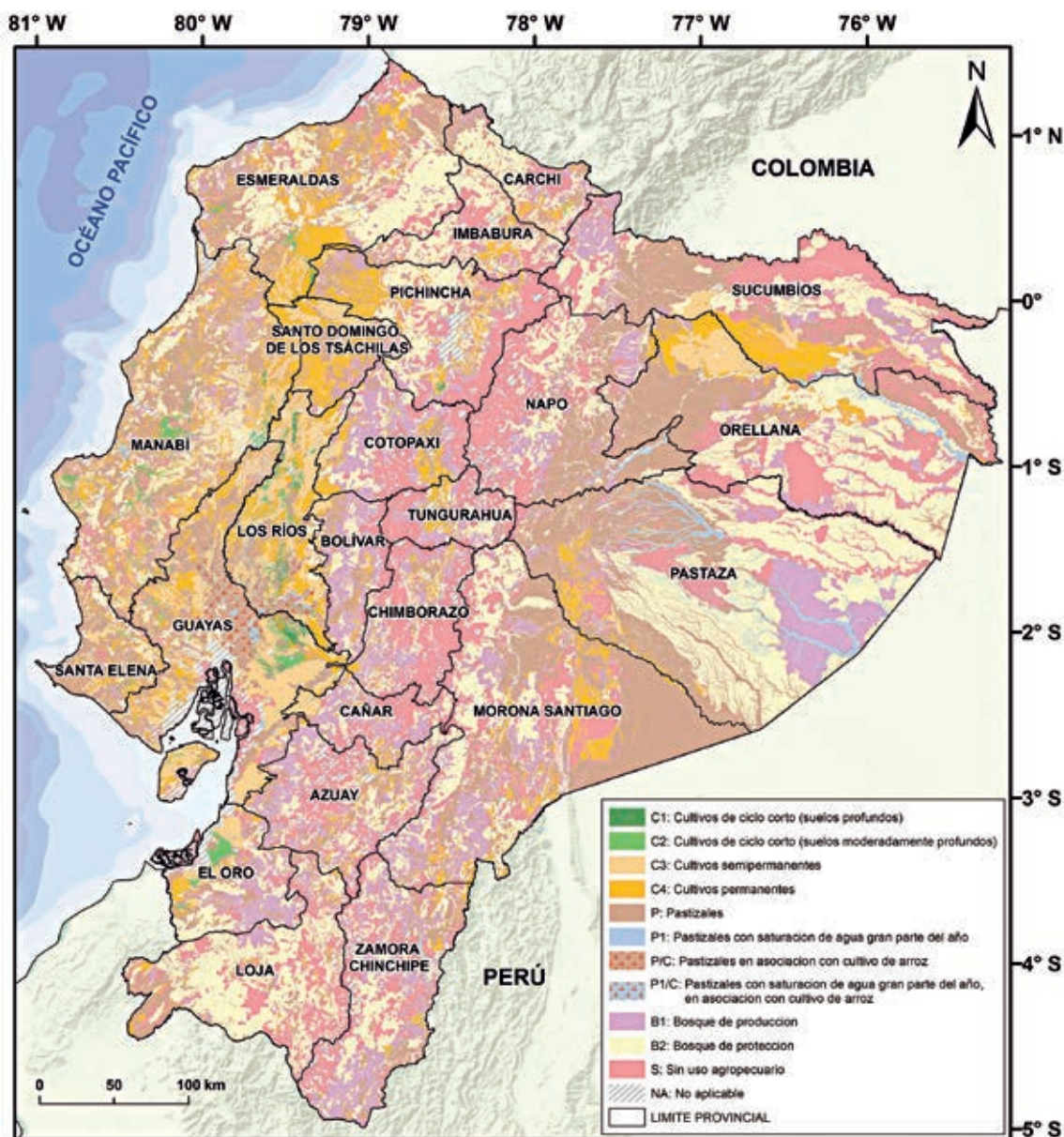


Figura 6.11. Mapa de aptitudes agrícolas del Ecuador continental (MAG, 2019).

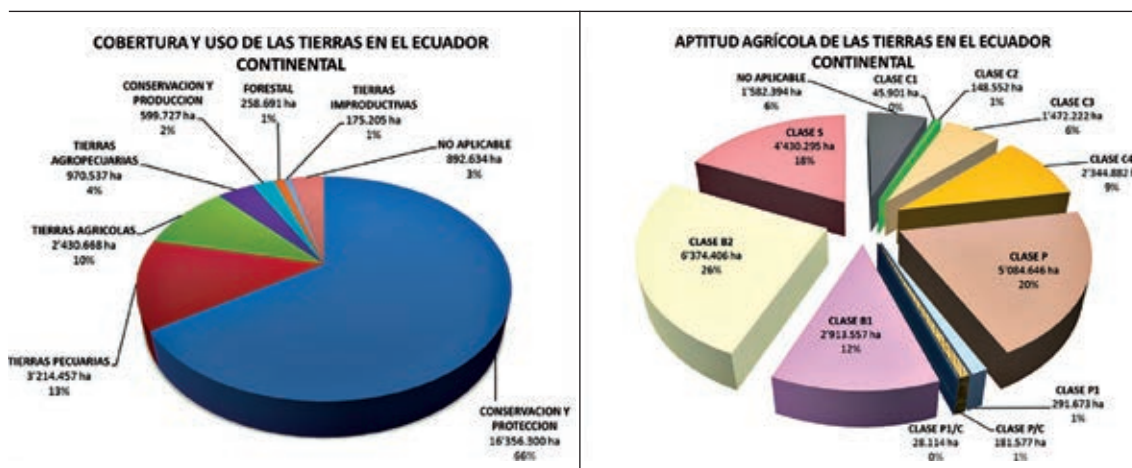


Figura 6.12. Comparación entre el uso de la tierra y la aptitud agrícola en el Ecuador continental.

6.4. Conflictos de uso de la tierra

Los conflictos se generan cuando se utiliza la tierra de manera insuficiente o se la utiliza sobrepasando el uso potencial o vocacional del sitio (Garzón, *et al.*, 2002). Basándose en las necesidades de conservación y recuperación de tierras, y en los determinantes y preferencias de uso de los recursos naturales en el país, se establecieron las zonas del territorio nacional continental que por uso inadecuado (conflictos de uso) son tierras sobreutilizadas o, por el contrario, tierras que están subutilizadas. La cobertura natural sin intervención antrópica que se encuentra fuera del bosque natural no se toma en cuenta en la evaluación de conflictos de uso, pues son áreas donde el hombre no ha modificado las condiciones naturales y no ha hecho un uso determinado a la tierra.

6.4.1. Áreas intervenidas

El área total de tierras, parcial o totalmente intervenidas, con usos productivos y extractivos asciende al 29 % del territorio nacional continental que corresponde a 7 306 666 ha (Figura 6.10 y 6.13). Concomitantemente, el 64 % de la superficie del Ecuador continental no presenta intervención antrópica, o ésta es muy ligera, y se mantiene la cobertura vegetal original. Estas zonas están representadas, principalmente, por el bosque nativo de la región Amazónica y de las estribaciones occidentales y orientales de la Cordillera de los Andes. Se incluyen, además, los relictos de bosques naturales en las demás regiones naturales de Ecuador, coberturas de glaciares, vegetación arbustiva y herbácea y eriales del país.

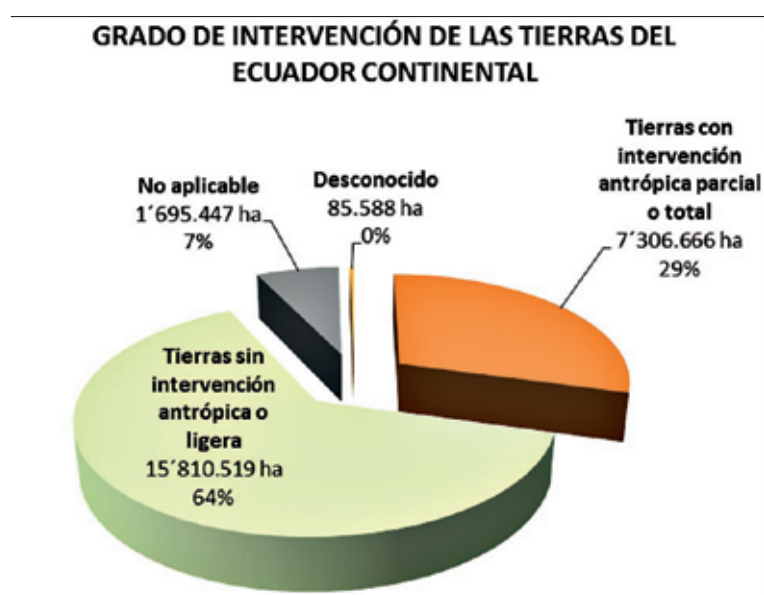


Figura 6.13. Grado de intervención de las tierras del Ecuador continental.

6.4.2. Tierras con uso adecuado o sin conflicto de uso

Del área parcial o totalmente intervenida en Ecuador, el 24 % no presenta conflictos de uso, es decir, el uso actual corresponde con la aptitud y la utilización de la tierra es compatible con las características edafo-climáticas del sitio (Figura 6.14). Del total de tierras bien utilizadas y sin conflictos, a nivel nacional, solamente el 52 % se asocia a tierras con vocación pecuaria en usos ganaderos de diversa intensidad, el 34 % a usos agrícolas en tierras con vocación agrícola, principalmente, con cultivos permanentes; mientras que el 12 % se relaciona con tierras cuya cobertura está parcialmente intervenida en áreas con vocación silvo-agrícola, donde el uso actual corresponde a actividades extractivas o agropecuarias poco intensas. La distribución de las tierras con uso adecuado o sin conflicto de uso se presenta en la Figura 6.15.

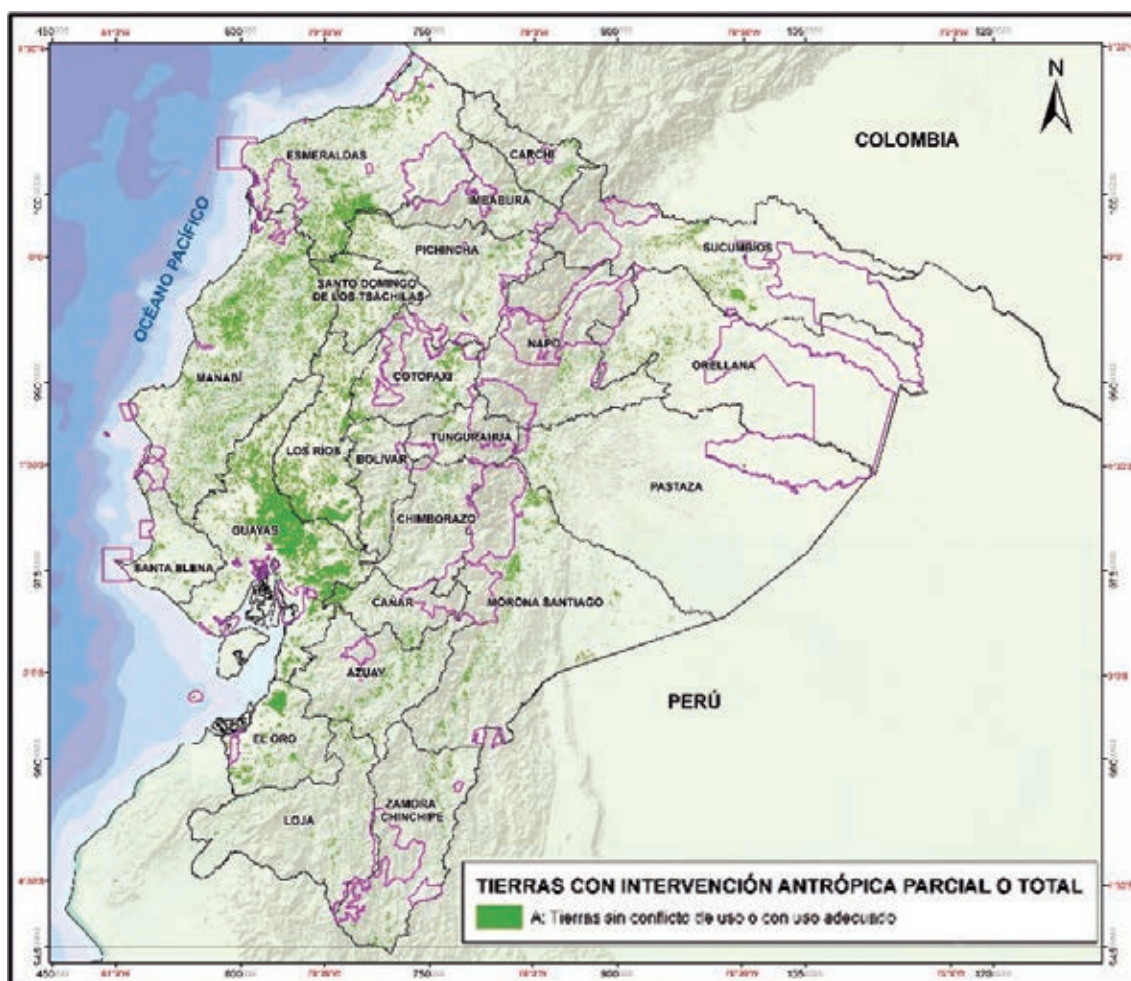


Figura 6.14. Localización de las tierras sin conflicto de uso o con uso adecuado en el Ecuador continental.

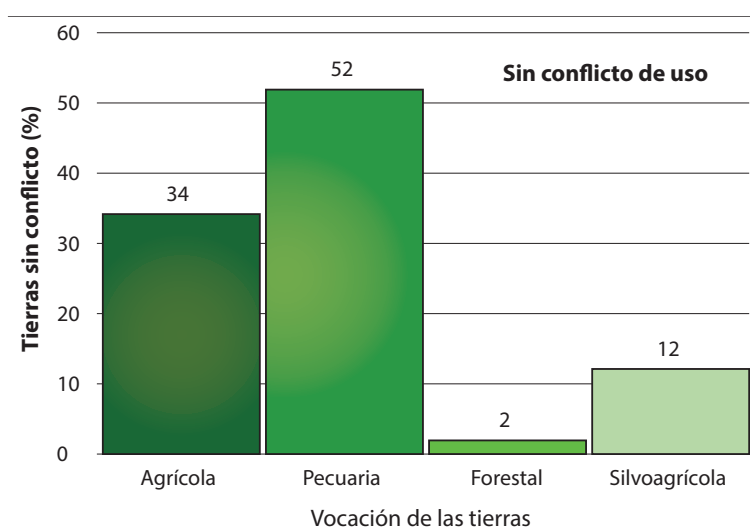


Figura 6.15. Composición de la vocación de las tierras sin conflicto en el Ecuador continental.

especial para cultivos de ciclo corto, que en la actualidad se encuentran utilizadas en actividades pecuarias de baja a moderada intensidad, cuyas coberturas están constituidas, principalmente, por pastos naturales. También son evidentes las áreas pobladas (203 917 ha) y aquellas en procesos de urbanización (42 355 ha), que con viviendas, edificios, caminos, redes de comunicación, etc., sellan la superficie y anulan la actividad normal del suelo. El sellado es la forma más intensa de ocupación que altera el suelo de forma irreversible bloqueando sus funciones naturales (Comisión Europea, 2013). El crecimiento poblacional promueve la ampliación y dispersión constante de las zonas urbanas en suelos fértiles, desplazado la actividad agrícola hacia suelos con menor capacidad de uso (menor profundidad del perfil o ubicación en pendientes) que son más susceptibles a la erosión. La urbanización también afecta la evacuación de los flujos hídricos y aumenta el riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierras (Sánchez y Castillo, 2004).

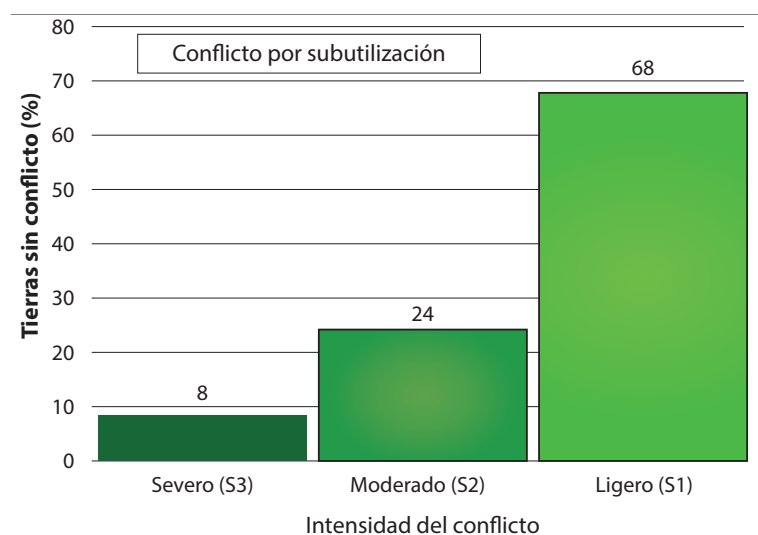


Figura 6.17. Grados de intensidad de las tierras con conflictos de uso por subutilización en el Ecuador continental.

6.4.4. Tierras en conflicto por sobreutilización (O)

El conflicto de uso por sobreutilización de las tierras se manifiesta cuando el agroecosistema predominante en una determinada zona utiliza en forma intensa la base natural de los recursos sobrepasando su capacidad productiva y no concuerda con el potencial y limitaciones de la clase de capacidad de uso recomendada, generando repercusiones negativas a mediano y largo plazo, que afectan la sostenibilidad de la cantidad y calidad de los recursos naturales del sitio (Garzón, *et al.*, 2002).

El 52 % del área intensamente alterada del país (3 818 036 ha) presenta conflictos por sobreutilización, con diverso grado de intensidad, debido a que el uso actual de los recursos no se ajusta a las limitaciones impuestas por la naturaleza (**Figura 6.18**). Las tierras sobreutilizadas en grado severo y moderado representan más del 85 % del área total sobreutilizada, es decir, un área de 2 472 471 ha con alto riesgo de sufrir degradación y, por ende, de perder su capacidad para cumplir adecuadamente con la prestación de los servicios de producción y ambientales propios de su naturaleza (**Figuras 6.19 y 6.20**). Sin embargo, solamente las tierras con sobreutilización severa cubren una extensión de 2 013 310 ha, correspondientes al 28 % del área de tierra intervenida en Ecuador. Aproximadamente, el 53 % de las tierras sobreutilizadas en grado severo se asocian con la presencia de actividades agropecuarias en tierras de usos forestales de protección y conservación (**Figura 6.20**). Igual es la tendencia de las tierras con sobreutilización moderada, donde el 48 % del área son tierras dedicadas a cultivos de ciclo corto que, si bien tienen vocación agrícola, deben ser utilizadas con cultivos permanentes, el 32 % utiliza tierras forestales de protección con vegetación herbácea de producción, el 18 % se encuentra cubierto de cultivos cuando su vocación es pecuaria y el 2 % restante del área se encuentra cubierta con cultivos de ciclo corto en tierras con vocación agrícola, pero para cultivos semipermanentes.

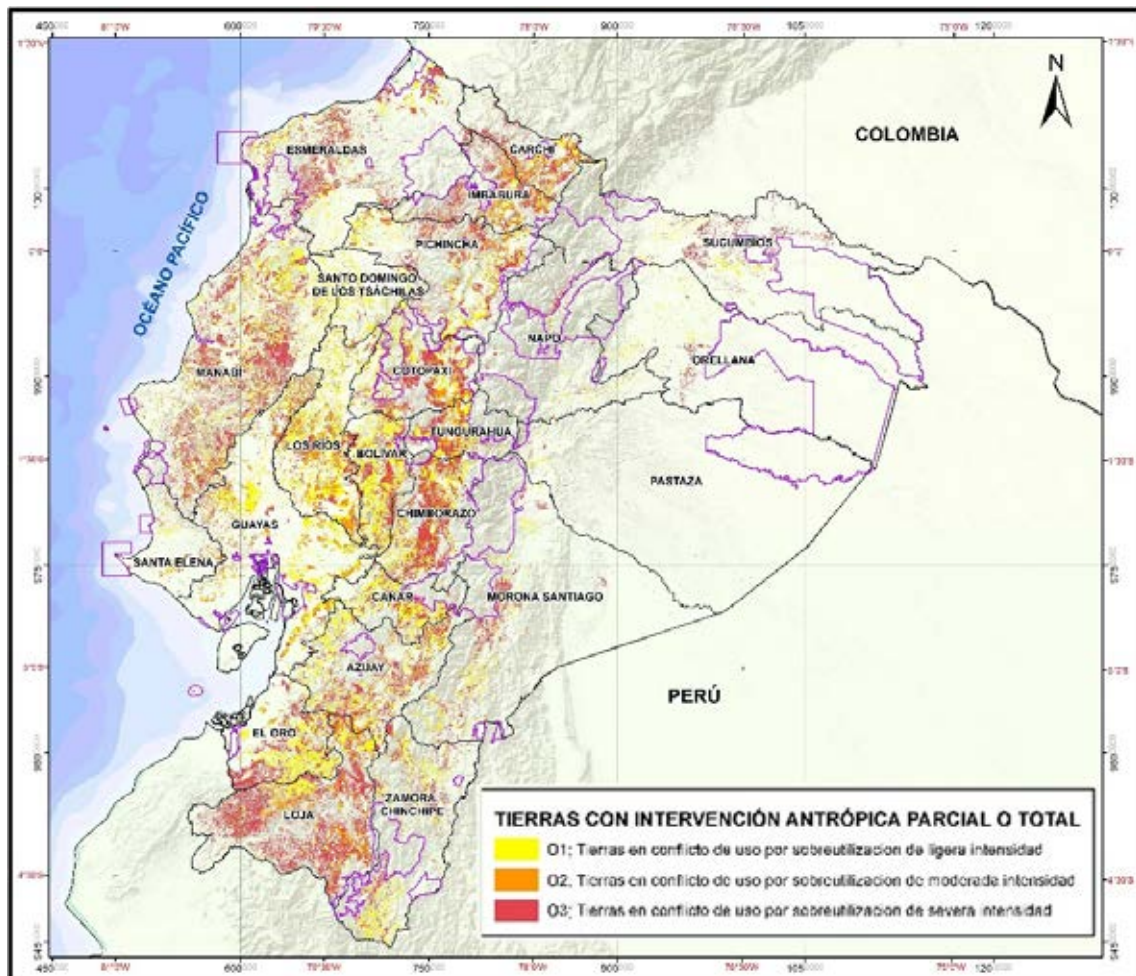


Figura 6.18. Localización de las tierras en conflicto de uso por sobreutilización en el Ecuador continental.

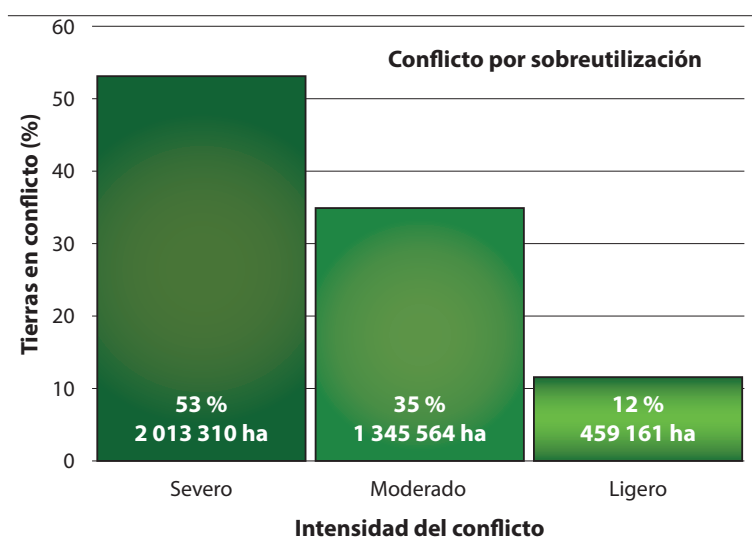


Figura 6.19. Grado de intensidad de las tierras con conflictos de uso por sobreutilización en el Ecuador continental.

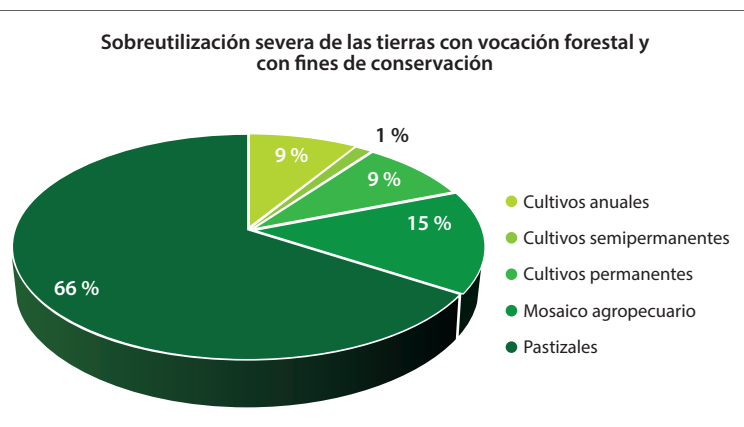


Figura 6.20. Porcentaje de ocupación en las diferentes clases de cobertura en tierras con sobreutilización severa cuya vocación principal es forestal y con fines de conservación.

6.4.5. Mapa de uso adecuado y conflictos de uso de las tierras

Los retos en términos de ordenamiento territorial, planificación del uso del territorio y redistribución equitativa de los recursos del país son de gran magnitud y requieren de soluciones prácticas para remediar conflictos sociales no resueltos, que en ocasiones traspasan la frontera de lo biofísico, para preservar los recursos naturales y buscar el bienestar de la población.

Los conflictos de uso por subutilización de las tierras deben considerarse como una oportunidad para intensificar el uso agropecuario e incrementar la productividad al utilizar adecuadamente las tierras ya intervenidas. Sin embargo, en aquellas tierras en conflicto por sobreutilización es necesario ejecutar prácticas efectivas de manejo y conservación de suelos, cambiar los sistemas de producción agropecuaria intensiva en tierras de ladera e implantar otros mecanismos de control que reduzcan la intensa degradación de los recursos naturales.

Es evidente que el país necesita reformular las políticas, reglamentación y planificación de uso de los territorios basándose en un mejor conocimiento de los recursos administrados y las demandas y las interacciones entre las tierras y sus usos, todo esto en el marco de la nueva normativa propuesta por la Ley Orgánica de Tierras y Territorios Ancestrales y la Ley de Ordenamiento Territorial y Gestión de Uso del Territorio. Un insumo importante para lograr este objetivo es la información básica y el mapa de uso adecuado y conflictos de uso de las tierras de Ecuador (**Figura 6.21** y **Cuadro 6.5**) publicados por el MAG (2021) como fruto de más de una década de recopilación y análisis de la información compilada por el IEE, SIGTIERRAS y el MAG.

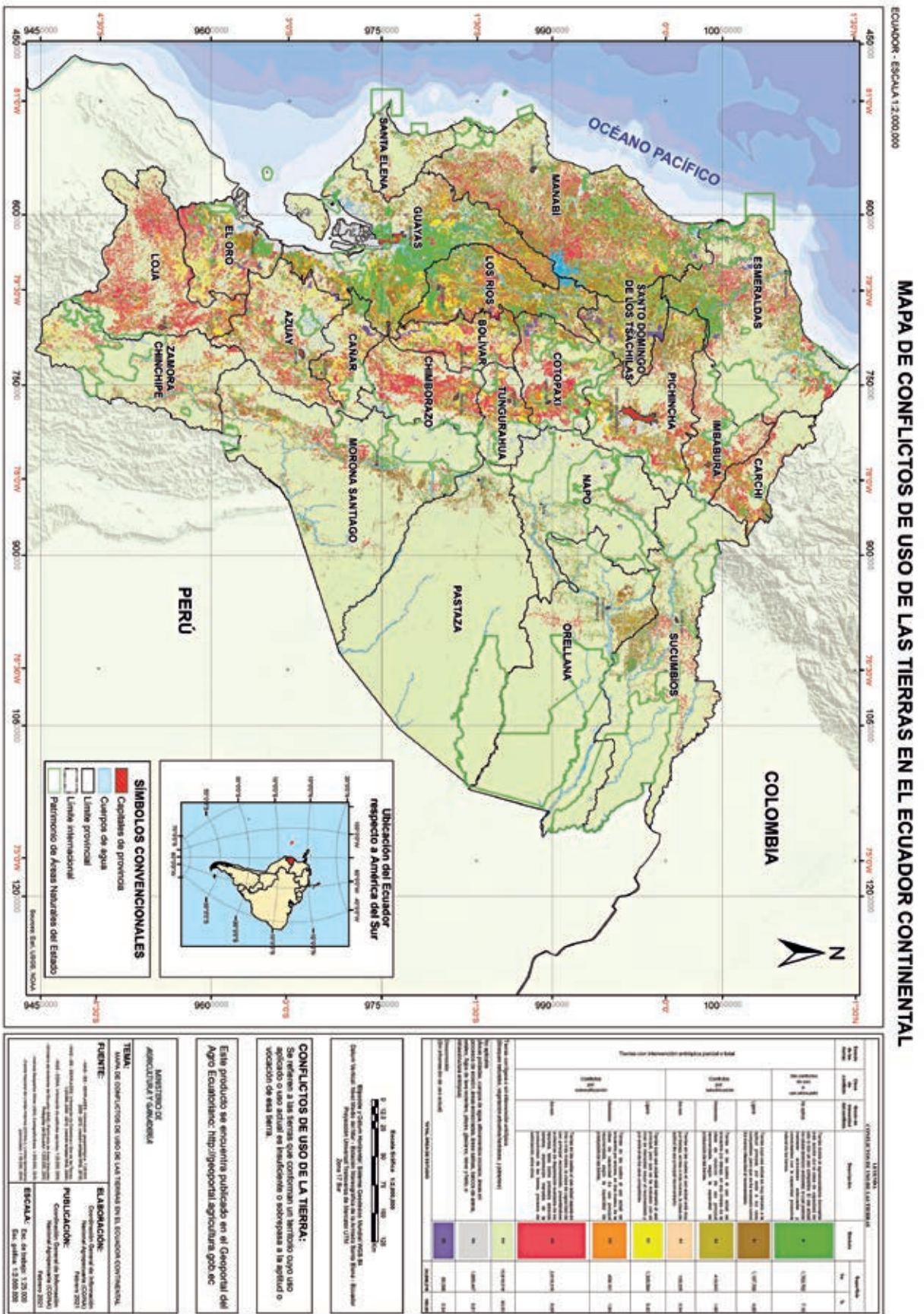


Figura 6.21. Mapa de uso adecuado y conflictos de uso de las tierras en el Ecuador continental (MAG, 2021).

Cuadro 6.5. Leyenda del mapa de uso adecuado y conflictos de uso de tierras en el Ecuador continental (MAG, 2021).

Estado de las tierras	Clase de conflicto	Grado de intensidad conflicto	Descripción	Símbolo	Superficie	
					ha	%
Tierras con intervención antrópica parcial o total	Sin conflictos de uso o uso adecuado	Ninguno	Tierras donde el agroecosistema dominante está acorde con la clase de capacidad de uso o con un uso compatible. El uso actual no causa deterioro ambiental, lo cual permite mantener actividades adecuadas y concordantes con la capacidad productiva natural de las tierras.	A	1 783 762	7.16
	Conflictos por subutilización	Ligero	Tierras cuyo uso actual es muy cercano a la aptitud principal, por ende a los usos compatibles, pero que se ha evaluado como de menor intensidad al recomendado.	S1	1 157 700	4.65
		Moderado	Tierras en las cuales el uso actual se encuentra por debajo en dos niveles de la clase de vocación de uso principal recomendada, según la capacidad de producción de las tierras.	S2	413 943	1.66
		Severo	Tierras en las cuales el uso actual está muy por debajo en tres o más niveles de la clase de aptitud de uso principal recomendado.	S3	133 943	0.54
	Conflictos por sobreutilización	Ligero	Tierras cuyo uso actual está cercano al uso principal, pero que se ha evaluado con un nivel de intensidad mayor al recomendado y por ende al de los usos compatibles.	O1	1 345 564	5.33
		Moderado	Tierras en las cuales el uso actual se encuentra por encima en dos niveles de la clase de capacidad de uso principal recomendada, según la capacidad de producción de las tierras.	O2	459 161	1.84
Severo		Tierras en las cuales el uso actual supera en tres o más niveles la clase de capacidad de uso principal recomendado, presentándose evidencias de degradación avanzada de los recursos, tales como procesos erosivos severos, disminución marcada de la productividad de las tierras, procesos de salinización, entre otros.	O3	2 013 310	8.09	
Tierras con ligera o sin intervención antrópica			Bosques naturales, vegetación arbustiva-herbácea y páramos	SIN	15 810 519	63.50
No aplicable			Áreas pobladas, cuerpos de agua, afloramientos rocosos, áreas en procesos de erosión, áreas erosionadas, áreas salinas, bancos de arena, eriales, flujos de lava recientes, playas, glaciares, nieve y hielo, e infraestructura.	NA	1 695 447	6.81
Desconocido			Sin información de uso actual	DE	85 588	0.34
Total área de estudio					24 898 937	100.00

6.5. Referencias Bibliográficas

- ANCUPA. 2014. Estadísticas de Palma Aceitera en Ecuador. Disponible en <https://www.google.com/search?q=ancupa&ie=utf-8&oe=utf-8>
- Andrade, H., O. Bastidas y S. Sherwood. 2002. La papa en Ecuador. En: M. Pumisacho y S. Sherwood (eds). El cultivo de la papa en Ecuador. INIAP-CIP. Quito, Ecuador. p. 21-24.
- ANECACAO. 2021. Historia del cacao. Disponible en <http://www.anecacao.com/es/quienes-somos/historia-del-cacao.html>

- Berry, A. y L. North. 2011. Los beneficios de la pequeña propiedad en el campo. Rebelión. Quito, Ecuador. <http://www.rebelion.org/noticias/2011/10/138180.pdf>
- Brassel, F., P. Ruiz y A. Zapatta. 2008. La estructura agraria en el Ecuador: una aproximación a su problemática y tendencias. En: F. Brassel, S. Herrera y M. Laforge (eds). Reforma Agraria en el Ecuador: viejos temas nuevos argumentos. SIPAE. Quito, Ecuador. p. 17-32.
- CAMAREN. 2021. Producción de cacao. Disponible en <https://camaren.org/produccion-el-cultivo-del-cacao-2/>
- Carrión, D. y S. Herrera. 2012. Ecuador rural del Siglo XXI: Soberanía alimentaria, inversión pública y política agraria. Instituto de Estudios Ecuatorianos. Quito, Ecuador.
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP, SIGAGRO y MRNNR. 2011. Memoria técnica de geopedología y amenazas geológicas del cantón Guayaquil. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales de la cuenca del río Guayas escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2lYkBtd>
- Comisión Europea. 2013. Los costes ocultos del sellado del suelo: En busca de alternativas a la ocupación y el sellado del suelo. Oficina de publicaciones de la Unión Europea. Roma, Italia.
- FAO. 2020. FAOSTAT. Disponible en <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/compare/Q/QC/S>
- FLACSO, MAE y PNUMA. 2008. Geo Ecuador 2008: Informe sobre el estado del medio ambiente. FLACSO - MAE - PNUMA. Quito, Ecuador.
- Garzón, E., J. Botón y R. Siachoque. 2002. Zonificación de los conflictos de uso de las tierras del país. En: D. Malagón, E. Garzón, A. Palacios y M. Romero (eds). Uso adecuado y conflictos de uso de las tierras en Colombia. IGAC-CORPOICA. Bogotá, Colombia.
- Gondard, P. y H. Mazurek. 2001. Treinta años de reforma agraria y colonización en el Ecuador (1964-1994). CEN, CGE, IRD, PUCE. Quito, Ecuador.
- Hidalgo, M., C. Proaño y V. Sandoval. 2011. Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de hortalizas enlatadas. Maestría en Gestión de Empresas, Escuela Politécnica del Ejército (ESPE). Magister en gestión de Empresas. Latacunga, Ecuador.
- Hidrobo, J., M. da Costa, C. Prat, G. Trujillo, J. Moreno y C. Ortega. 2015. Sistemas de producción en áreas con cangahua habilitada en la Sierra Norte de Ecuador. Revista Siembra, 2: 116-127.
- Huttel, C., C. Zebronski, P. Gondard y J. Bourliaud. 1999. Paisajes agrarios de Ecuador. IFEA-IGM-IPGH-IRD-PUCE. Quito, Ecuador.
- IGM. 2013. Atlas geográfico de la República del Ecuador. IGM-SENPLADES. Quito, Ecuador.
- IGM. 2020. Geovisualizador Instituto Geográfico Militar. Mosaico de Uso de la Tierra 1:25.000. Disponible en <https://bit.ly/2lTzM6Z>
- INEC. 2013. Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua Ecuador 2013. Disponible en <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/estadisticas-productivas>
- INEC. 2020. Boletín Técnico N° 01-2019-ESPAC. Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua, 2019. INEC. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/38W4Jh4>
- Jara, C. y M. Chiriboga. 1984. Problemática agraria y alternativas. En: J. Ponce (ed) Ecuador Agrario. Editorial Conejo. Quito, Ecuador.
- Jarrín, P., L. Tapia y G. Zamora. 2017. Demografía y transformación territorial: Medio siglo de cambio en la región amazónica de Ecuador. Eutopía: Revista de Desarrollo Económico Territorial: 81-100.

- MAG. 2018. 2017, año clave para la exportación de quinua en Ecuador. Disponible en <https://www.agricultura.gob.ec/2017-ano-clave-para-ecuador-en-exportacion-de-quinua/>
- MAG. 2019. Mapa de aptitudes agrícolas del Ecuador Continental, escala 1: 25 000. Memoria técnica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria. Quito, Ecuador.
- MAG. 2020a. Cifras agroproductivas. Sistema de Información Pública Agropecuaria. Quito, Ecuador. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>
- MAG. 2020b. Geoportal del Agro Ecuatoriano. Sistema de Información Pública Agropecuario. Disponible en <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- MAG. 2020c. Mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental, escala 1: 25 000. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria. Quito, Ecuador.
- MAG. 2021. Mapa de conflictos de uso de las tierras en el Ecuador continental, escala 1: 25 000. Memoria técnica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria. Quito, Ecuador.
- Manchego, C., P. Hildebrandt, J. Cueva, C. Espinosa, B. Stimm and S. Günter. 2017. Climate change versus deforestation: Implications for tree species distribution in the dry forests of southern Ecuador. PloS one 12: e0190092.
- Nieto, C. y A. Vicuña. 2015. Las tierras y territorios rurales como escenarios funcionales para la práctica de la Economía Popular y Solidaria en Ecuador: algunos elementos sobre su uso y aprovechamiento. Siembra 2: 1-13.
- Pacheco, R. 2009. El Ecuador: Recursos naturales agrícolas y del medio ambiente. Imprenta Colón. Quito, Ecuador.
- Patiño, V. 1967. Plantas cultivadas y animales domésticos de América equinoccial. Imprenta Departamental. Cali, Colombia.
- Peralta, E. 2009. La quinoa en Ecuador: Estado del arte. INIAP, Estación Experimental Santa Catalina. Quito, Ecuador.
- PROECUADOR. 2013. Monitoreo de las exportaciones. Disponible en <http://www.proecuador.gob.ec/monitoreo-de-exportaciones/>
- Sánchez, y M. Castillo. 2004. La estrategia temática para la protección del suelo: Un instrumento para el uso sostenible de los suelos en Europa. Revista Ecosistemas 13: 59-61.
- SIGTIERRAS. 2015. Metodología para la evaluación de las tierras por su capacidad de uso: Proyecto: Levantamiento de Cartografía Temática a escala 1: 25 000, lotes 1 y 2. SIGTIERRAS. Quito, Ecuador.

CAPÍTULO 7

EROSIÓN DEL SUELO

— EN ECUADOR —

José Espinosa, Consultor: jepinosa@fragaria.com.ec

Renato Haro, Consultor: renoharo@hotmail.com

Julio Moreno, Instituto Geográfico Militar (IGM): vjmi76.jm@gmail.com

Freddy Amores, Consultor: famores.ec@gmail.com

Oscar Ayala, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI): oayala@inamhi.gob.ec

RESUMEN

Este capítulo describe detalladamente el proceso de erosión activa en todas las regiones de Ecuador, considerado como uno de los problemas ambientales de mayor impacto en el país. El proceso es muy severo en los flancos interiores y exteriores de la cordillera de los Andes, en los valles internos de la Sierra y en el pie de monte de la Costa y la Amazonía. Además, la erosión es también evidente en amplias áreas con relieve irregular de la Costa y Amazonía. El proceso de erosión en el país es de vieja data y en el pasado se lo consideró como un fenómeno natural fácil de subsanar porque en suelos con horizontes superficiales profundos era posible borrar la huella de la erosión con labranza y continuar con las actividades agrícolas sin aparente pérdida. Complementariamente, el crecimiento de la población ecuatoriana, que pasó de 9.29 millones en el año 1986 a 16.8 millones en el 2017, generó una alta presión sobre la tierra para producir alimentos. La agricultura sin adecuadas prácticas de manejo deteriora el suelo y causa problemas irreparables en los sitios donde ocurre limitando severamente la producción agrícola y generando abundantes sedimentos que salen del campo y afectan caminos, reservorios y otras obras de infraestructura que deben ser rehabilitadas con alto costo por los gobiernos seccionales. Por esta razón, Ecuador necesita desarrollar en forma inmediata un Plan Nacional de Manejo y Conservación de Suelos que controle la erosión y preserve el suelo y que, además, habilite los suelos erosionados para volverlos a incorporar a la producción. Las medidas de conservación para mantener las funciones ambientales del suelo y lograr producción sostenible de alimentos incluyen prácticas mecánicas y agronómicas de control de erosión, en su mayoría simples y de costo razonable. Si bien todo esto es materialmente posible, quizá el principal reto es convencer a las entidades gubernamentales y privadas, y al mismo agricultor, de la necesidad urgente de desarrollar un Programa Nacional de Control de Erosión, particularmente si se toman en cuenta los efectos innegables del cambio climático que incrementarían la intensidad de las precipitaciones en varias zonas en el país. Sin embargo, un programa efectivo a nivel nacional requiere de considerable inversión y sus resultados no son visibles inmediatamente, razón por la cual no ha logrado el apoyo de los sectores políticos en el pasado. Parecería que las condiciones del país han cambiado en los últimos años y que se ha generado un ambiente favorable para implementar un proyecto de esta naturaleza que podría basarse en la información cartográfica desarrollada por el Ministerio de Agricultura en varias de sus dependencias o en coordinación con otras instituciones y que está disponible en las plataformas virtuales del Ministerio y del Instituto Geográfico Militar. La gestión del proyecto se podría desarrollar basándose en la gobernanza lograda por los Gobiernos Autónomos Descentralizados, varios de los cuales han conducido un trabajo efectivo en la habilitación de cangahua.

ABSTRACT

This chapter describes in detail the active soil erosion process in all Ecuadorian regions, process which is considered as one of the country main environmental problems. The process is severe in the internal and external flanks of the Andes, in the internal Highland valleys, and in the piedmont of the Coast and the Amazonia. Erosion is also evident in the ample areas of irregular relieve of the Coast and the Amazonia. The erosion process in the country is long lasting but, in the past, it was considered a natural event easy to solve because in soils with a deep superficial horizon it was possible to erase the soil erosion print with tillage and continue with the activities with no apparent loss. Ecuadorian population changed from 9.29 million in 1986 to 16.8 million in 2017 and this growth generated a high land pressure to produce food. Agricultural activities without adequate management practices deteriorates the soil and provokes irreparable losses in the site where it takes place, seriously limiting agricultural production and generating abundant sediments which leave the field severely affecting roads, reservoirs and other infrastructure that needs to be rehabilitated at a high cost for the sectional governments. For this reason, Ecuador needs to develop a National Soil Management and Conservation Plan to control soil erosion and to rehabilitate already eroded soil to be incorporated again to production. Conservation practices to maintain soil environmental services and to achieve sustainable food production include mechanical and agronomic techniques, in general simple to develop at reasonable cost. Though materially possible, perhaps the main challenge is to convince government and private institutions, and the farmer himself, of the urgent need to develop a National Program Soil Management and Erosion Control, particularly taking in account the undeniable effects of climate change which would increase rainfall intensity in several zones in the country. However, an effective program at national level requires considerable investment and results are not visible immediately, for this reason it has not received attention from politicians in the past. It seems that the country's conditions have changed in the past few years generating a favorable environment to implement such project which could base its activities in the cartographic information developed by the Ministry of Agriculture in its dependencies or in coordination with other institutions and which is available in the Ministry and the Military Geographic Institute virtual platforms. The project management could be based in the governance achieved by the Autonomous Sectional Governments, several of which have conducted an effective job in cangahua rehabilitation.

7.1. Introducción

La erosión es el arrastre de los materiales sólidos de la superficie del suelo. La erosión natural, provocada a través del tiempo por acción del aire, agua, nieve o hielo, es un proceso muy lento que permite el equilibrio entre la pérdida y la formación del suelo. Sin embargo, la intervención humana con actividades agrícolas y la construcción de infraestructura promueve el rápido arrastre de las partículas sólidas de la superficie del suelo acelerando considerablemente el proceso erosivo con una intensidad que varía de unos escenarios a otros. La intensidad y forma de la erosión dependen de la inclinación y longitud de la pendiente, la intensidad y frecuencia de las lluvias, de la velocidad del viento, de las características del suelo, de la cobertura vegetal y del uso y manejo del suelo. Debido al muy lento proceso de formación natural del suelo, se estima que es prácticamente imposible recuperarlo luego que ha salido del sitio por erosión inducida, por esta razón, se considera que el suelo es un recurso no renovable a la escala humana de tiempo. La erosión es el efecto más visible de todos los procesos de degradación del suelo (Zuazo and Pleguezuelo, 2008; Pimentel and Burgess, 2013).

Existen problemas de erosión en todas las regiones de Ecuador, sin embargo, el proceso es muy severo en los flancos interiores de la cordillera y en los valles internos de la Sierra, en los flancos exteriores de la cordillera y en el pie de monte de la Costa y la Amazonía. Además, la erosión es también evidente en las zonas de relieve irregular de la Costa y la Amazonía. La presión sobre la tierra ha obligado a los productores a usar suelos con diferente grado de pendiente ubicados en las zonas antes mencionadas. El proceso erosivo se inicia con la eliminación de la cubierta vegetal natural para empezar las labores agrícolas, sin antes tomar precauciones para controlar la potencial pérdida de suelo. La preparación para colocar la semilla deja la superficie del suelo expuesta a los agentes erosivos (agua y viento), las gotas de lluvia que caen sobre la superficie descubierta desprenden las partículas de suelo que son arrastradas del sitio por el agua de escorrentía, formando primero pequeñas zanjas que luego se agrandan hasta formar cárcavas de gran tamaño. De esta forma, grandes áreas pierden completamente la capa superficial del suelo y aflora el subsuelo de baja fertilidad y pobres propiedades físicas. En la Sierra Norte aparece la matriz endurecida denominada cangahua donde es imposible hacer agricultura (Espinosa y Maldonado, 1987; de Noni, *et al.*, 1992; Zebrowski, 1997; de Noni y Trujillo, 1999b; Prat, *et al.*, 2015).

Existe evidencia de que en épocas precoloniales en la región interandina de Ecuador era común la agricultura conservacionista que se adaptaba a las condiciones de los paisajes andinos construyendo, por ejemplo, terrazas y camellones (**Figura 7.1**). La agricultura vulnerable a la erosión traída por los colonizadores cambió las prácticas de manejo del suelo, actividades que se evidencian en las actuales formas de explotación de la tierra (de Noni, 1986; Becker y Tutillo, 2009).

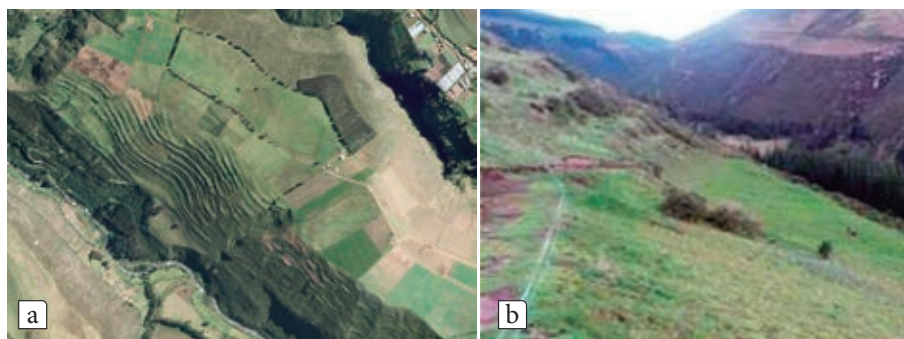


Figura 7.1. Terrazas de épocas preincaicas en la zona de Juan Montalvo-Cayambe; a) fotografía aérea de SIGTIERRAS (2010); b) fotografía del sitio tomada en el 2017.

Una de las primeras descripciones de los procesos erosivos del pasado fueron los estudios que reconstruyeron los antiguos paisajes forestales del Ecuador que detallaron los procesos de pérdida de los horizontes orgánicos del suelo ocurridos en la Sierra Centro-Norte entre los siglos XVII y XVIII y que, en ese tiempo, se atribuyeron al avance de la frontera agrícola (Hidalgo, 1998). Teodoro Wolf (1892), en su recorrido por el Callejón Interandino, describió la Sierra Centro-Norte como territorio quebrado, cascajoso y parcialmente fértil, características que las atribuyó también al mal manejo agrícola introducido en la conquista española, manejo que no se adapta a los paisajes de la Sierra.

La misión del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), que trabajó en Ecuador en la década de 1940, condujo estudios de los procesos erosivos de la Sierra, generando varios métodos de control y manejo de tierras erosionadas de la región interandina. En este grupo de trabajo participó el investigador Misael Acosta Solís, quien generó varios reportes de erosión que finalmente fueron compilados en el libro “Por la Conservación de las Tierras Andinas” (Acosta Solís, 1952), obra en la que se indica que ya en ese tiempo el 90 % de las tierras que habían sido cultivadas en la región interandina sufrían de procesos erosivos (**Figura 7.2**) y que de este total, el 85 % presentaban procesos erosivos severos, advirtiendo también que las tierras que no parecían erosionadas estaban encaminadas al mismo deterioro. Los trabajos de la misión de USDA fueron recopilados y luego publicados por Miller en la revista *Geographical Review* (**Figura 7.3**) (Miller, 1959).

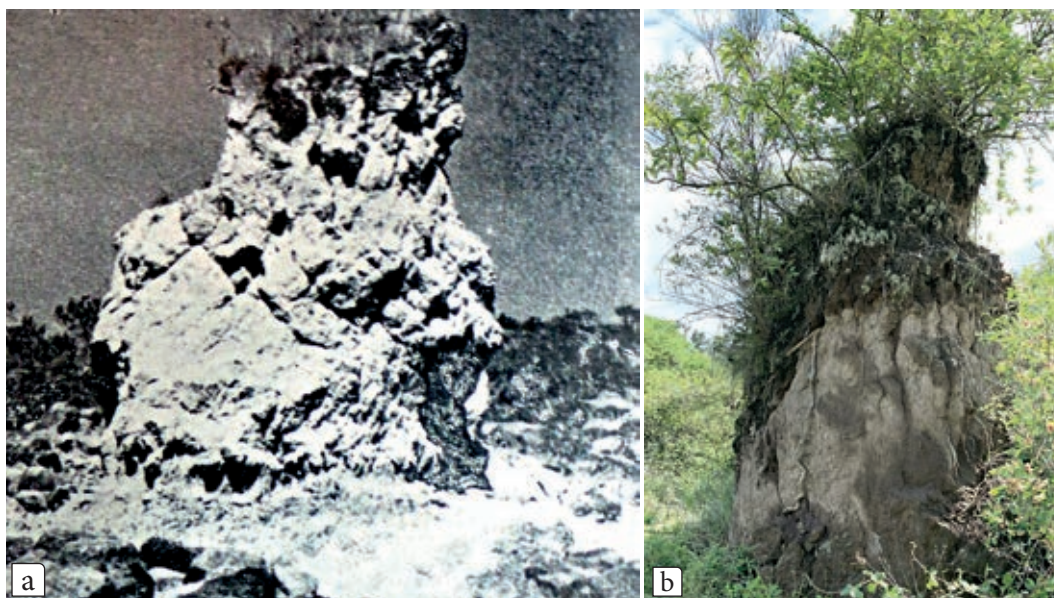


Figura 7.2. Vestigios de erosión en el volcán Ilaló, Pichincha: a) lado Este documentado por Acosta Solís (1952), b) fotografía del lado Norte tomada en el 2019.



Figura 7.3. Erosión de suelos en laderas áridas de Calderón, norte de Quito (Miller, 1959).

En 1981, el Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI) publicó los resultados del estudio denominado “Evaluación de los Recursos Hidrológicos Superficiales del Ecuador”. En ese trabajo se dividió al país en 76 cuencas hidrográficas de acuerdo con la importancia de los recursos, la potencialidad de desarrollo y/o el estado de degradación de los recursos naturales de estas vertientes. Con respecto a la degradación de las cuencas, el estudio indicó que uno de los principales problemas era la reducción de la cubierta vegetal que promovía un dinámico proceso de erosión que contribuía a la descarga acelerada de grandes volúmenes de sedimentos a los cuerpos de agua. Se concluyó indicando que 16 de estas cuencas merecen mayor atención en su manejo ambiental y, específicamente, requieren de un reordenamiento del uso de la tierra y planificación del desarrollo (INERHI, 1981). Los resultados de este estudio también indican que la mayor degradación se observa en la parte alta de las cuencas, debido a la alteración de la cubierta vegetal y al mal manejo de sus suelos. Los resultados de la evaluación del comportamiento de tres microcuencas (río Chamachán de la subcuenca del río Chota, río Pasguaso y quebrada Chinigua de la subcuenca del río Cebadas) reportados por IICA-PROCIANDINO (1995) demostraron que entre el 21 al 25 % del área estaba afectada por erosión, considerándose que éste era un problema serio para la sostenibilidad de la región.

La gestión del Dr. Sam Portch, asesor científico de los departamentos de Suelos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), permitió que se desarrolle e implemente un proyecto de Conservación de Suelos que condujo actividad en el campo de 1981 a 1986. Se desarrollaron actividades de campo con agricultores en comunas de Imbabura, Cotopaxi, Chimborazo y Manabí. Al mismo tiempo se creó en el Ministerio de Agricultura (MAG) el Programa Nacional de Conservación de Suelos (PRONACOS) como extensión del PRONAREG. INIAP y PRONACOS capacitaron a más de 500 técnicos de nivel medio y profesionales en todo el país en técnicas de manejo del suelo para conservación. Estas personas debieron ser la base para implementar un Plan Nacional de Conservación de Suelos. El proyecto de INIAP no continuó con sus actividades luego de 1986, pero retomó su trabajo de conservación de suelos a pequeña escala a nivel de cuencas hidrográficas (Córdova and Novoa, 1995). PRONACOS desapareció como entidad pública dos años después de su creación debido a la reorganización del MAG. Varias instituciones privadas como CARITAS desarrollaron también actividades de campo para control de erosión por varios años.

El MAG y la Oficina de Investigación Científica y Técnica en el Extranjero (ORSTOM, por sus siglas en francés) publicaron, en 1984, los resultado del estudio denominado “Principales procesos erosivos del Ecuador” que generó el mapa de erosión a escala de 1: 1 000 000 con su respectiva leyenda explicativa (Almeida, *et al.*, 1984). Este estudio determinó que el 47 % del territorio nacional presentaba problemas erosivos de diferente tipo (principalmente hídrica y eólica), estableciéndose que el 12 % de las tierras degradadas estaban en la región Sierra (el 35 % restante correspondía al límite de la frontera agrícola, particularmente a las tierras altas, los flancos exteriores de la Sierra y áreas potencialmente afectadas de la Costa y el Oriente). El estudio también resaltó que la mayor pérdida de suelo (erosión activa y muy activa) se producía dentro del callejón interandino, estimándose que cerca del 50 % del área cultivada soportaba un proceso acelerado de erosión. El mapa original de este estudio fue adaptado y presentado por de Noni, *et al.* (1997) en su publicación “La erosión agrícola en los suelos de Ecuador” (Figura 7.4). Este mapa se ha reproducido en varias publicaciones que abordaron el problema de la erosión en el país (Loza, 1995; Custode, *et al.*, 1999; de Noni y Trujillo, 1999a; MAG, 1999; Suquilanda, 2008; Pacheco, 2009).

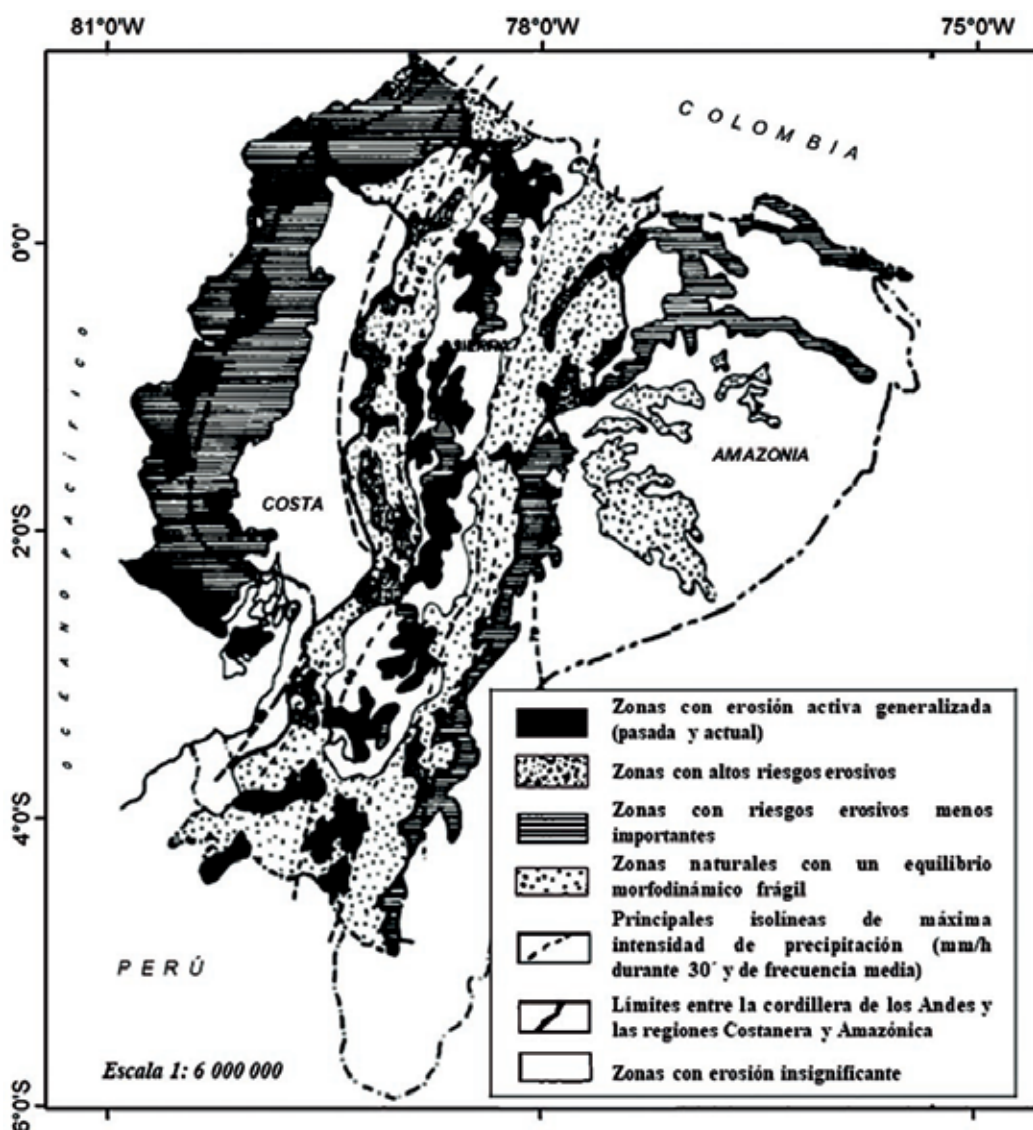


Figura 7.4. Mapa de los principales procesos erosivos en el Ecuador (de Noni, *et al.*, 1997).

Por otro lado, el reporte de un estudio conducido por el Centro Internacional de la Papa (CIP) señaló que las cuencas hidrográficas de la Sierra ecuatoriana estaban, en ese tiempo, sometidas a diferentes grados de erosión. Se determinó que el 26 % del área tenía riesgo potencial de erosión, el 4.1 % moderado, el 28.1 % serio y el 39.1 % crítico y que apenas el 2.7 % del área no presentaba riesgos de erosión (Espinosa, 1993). En consecuencia, los efectos de la erosión eran graves, particularmente por la sedimentación de los principales reservorios y causas de los ríos de la parte baja de las cuencas. Esta situación se evidenció en la represa de Paute, donde se estima se depositaban más de 3 millones de m³ de sedimentos cada año, situación que generó un costo cuantioso de dragado para mantener la presa en operación (Pacheco, 2009).

En 1999, el Sistema de Información Geográfica y Agropecuaria (SIGAGRO), hoy Coordinación General del Sistema de Información Nacional (CGSIN), en cooperación con el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA-PROCIANDINO) y el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), en el marco del proyecto denominado Generación de Información Georreferenciada para el Desarrollo Sustentable del Sector Agropecuario, elaboraron el mapa de Erosión Actual del Ecuador (**Figura 7.5**), basándose en la interpretación visual de imágenes satelitales LANDSAT TM del periodo entre los años 1999 y 2002, en combinación de las bandas 4-5-3 (vegetación, agua y suelo, respectivamente) y según la respuesta espectral de cada uno de los elementos de suelo. La información obtenida permitió determinar la existencia de dos niveles de erosión: zonas en proceso de erosión con una extensión de 272 136 hectáreas y zonas erosionadas con 52 349 hectáreas (González, *et al.*, 2002).

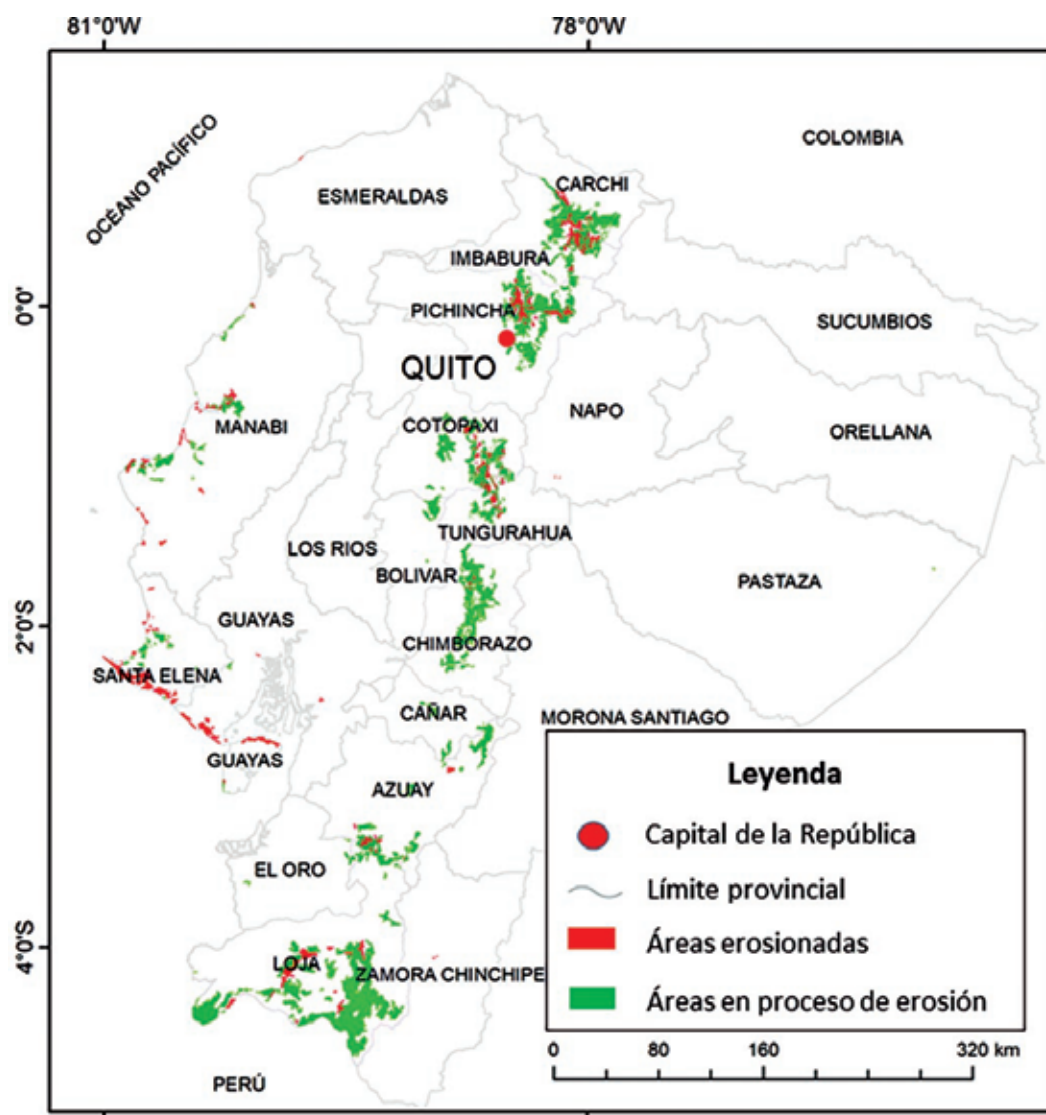


Figura 7.5. Mapa de erosión del Ecuador MAG-IICA-CLIRSEN (González, *et al.*, 2002).

Varios estudios sobre erosión se han conducido a través de los años en sitios puntuales de la Sierra (Custode y Viennot, 1986; Harden, 1993; Dehn, 1995; IICA-PROCIANDINO, 1995; Poulenard, *et al.*, 2001; Barrera, *et al.*, 2008; Alwang, *et al.*, 2013; Henry, *et al.*, 2013; Ochoa, *et al.*, 2013b). Otros estudios más recientes a nivel de tesis de grado incluyen ensayos de parcelas de escurrimiento, simulaciones de lluvia, modelamientos con la ecuación universal de pérdida del suelo, entre otros (Chela, 2008; Santos y Castro, 2012; Campaña, 2015; Pacheco, *et al.*, 2019; Zambrano, *et al.*, 2020). La variabilidad de estos estudios, debido a los diferentes años y sitios, hace difícil precisar cifras representativas de los procesos de erosión ya que se condujeron en parcelas experimentales y, dada la heterogeneidad de las zonas, se considera que las proyecciones a nivel de territorio basadas en estos datos sobredimensionan la magnitud del proceso erosivo (Trimble and Crosson, 2000; Boardman, 2006; Almorox, *et al.*, 2010).

7.2. Erosión en la Sierra Norte

Los suelos de la Sierra Norte (vertientes internas y fondos de las cuencas del callejón interandino) presentan características físicas, químicas y mineralógicas marcadamente diferentes del resto de la Sierra, así como diferente sensibilidad a la erosión. Los suelos de este gran paisaje se ubican en tres zonas: a) Vertientes Superiores, que limitan con las tierras frías de la cordillera a altitudes > 3 000 m s. n. m.; b) Vertientes Inferiores, que se ubican sobre los 2 600 m s. n. m.; y c) Fondos de las Cuencas, ubicados entre los 2 000 y 3 000 m s. n. m. (MAG, 1999; Espinosa and Moreno, 2018).

Las vertientes superiores presentan temperaturas bajas (< 13 °C) y están cubiertas con vegetación de páramo (en sus partes altas), pastos y otros cultivos (papa, haba, cebolla) mientras descienden. Los suelos de esta zona tienen un régimen isomésico de humedad y se clasifican como Andisoles (Soil Survey Staff, 2006) (**Figura 7.6**). Las propiedades físico-químicas de estos suelos están determinadas por la presencia de minerales amorfos (alófana) en el perfil, son de colores oscuros, ricos en materia orgánica del suelo (MOS), pH cercano a 6, baja saturación de bases, riesgo a toxicidad por aluminio, alta retención de humedad, fijación de fósforo, irreversibilidad en el secado, fácil compactación y de fertilidad media a baja. Actualmente, estos suelos están sometidos a una intensa actividad agrícola, disminuyendo paulatinamente su fertilidad por reducción del contenido de MOS y nutrientes debido a la eliminación de la capa protectora de vegetación de los lotes de cultivo, lo que los expone a la erosión laminar y en cárcavas (Custode, *et al.*, 1999; Moreno, *et al.*, 2018).



Figura 7.6. Perfil del suelo clasificado como Pachic Melanudands (MIDENA, *et al.*, 2013d).

Las vertientes inferiores presentan pendientes menores que son una transición hacia los modelados de los paisajes del fondo de las cuencas interandinias, con un clima que cambia de húmedo a seco conforme desciende de las zonas altas a las zonas bajas, condición característica del interior del callejón interandino, debido a que las corrientes de aire húmedo provenientes de las llanuras descargan su humedad en las

vertientes externas para luego descender por las vertientes internas como aire seco que aumenta su temperatura conforme se acerca a los valles, por esta razón, en estas zonas el régimen de temperatura del suelo es isotérmico (Moreno, *et al.*, 2018). Los suelos de esta zona se clasifican como Inceptisoles con presencia de vidrio volcánico y Mollisoles (Soil Survey Staff, 2006).

Los Inceptisoles que se presentan en la parte baja de la vertiente y en las partes altas y secas de las cuencas, están cubiertos por poca vegetación en condiciones naturales, son de color gris claro, sin o de poca estructura, bajo contenido de MOS, ricos en piedra pómez milimétrica (**Figura 7.7**). Estos suelos son susceptibles a la erosión hídrica y eólica, especialmente cuando son sobre explotados (pastoreo) (Moreno, *et al.*, 2018). Los Mollisoles son suelos de color negro a café oscuro, de estructura migajosa y consistencia suave, se caracterizan por una alta saturación de bases y alto contenido de MOS (**Figura 7.8**). Estos son suelos de buena fertilidad adecuados para la producción agrícola, siendo la limitante más importante la pendiente y en algunas zonas la presencia de cangahuas (protoduripán) a poca profundidad. Los suelos con cangahuas se clasifican como Durustolls (Soil Survey Staff, 2006). Cuando estos suelos están ubicados en pendientes pronunciadas y se saturan con agua pueden presentar movimientos en masa que arrastran los horizontes superficiales lo que provoca el afloramiento de las cangahuas (**Figura 7.9**) (Moreno, *et al.*, 2018).



Figura 7.7. Perfil del suelo clasificado como Vitrandic Haplustepts (MIDENA, *et al.*, 2013c).



Figura 7.8. Perfil del suelo clasificado como Pachic Hapludolls (MIDENA, *et al.*, 2013e).



Figura 7.9. Perfil del suelo clasificado como Entic Durustolls (MIDENA, *et al.*, 2013b).

Por otro lado, los fondos de las cuencas tienen una temperatura media anual que varía entre los 13 y 18 °C, con una pluviosidad media anual que va de 500 a 1000 mm (en algunos sectores el clima es árido, con precipitaciones de 200 a 500 mm), condiciones que han promovido el desarrollo de un régimen de temperatura de suelo isotérmico y régimen de humedad ústico (Moreno, *et al.*, 2018). Los suelos característicos de esta zona se clasifican como Mollisoles (Soil Survey Staff, 2006), de texturas francas o más gruesas, de colores oscuros, ricos en saturación de bases y MOS y presencia de cangahuas a diferentes profundidades y delgados horizontes argílicos en algunos de ellos (**Figura 7.10**). Los restos arqueológicos indican que estos suelos ya se habían explotado en épocas precoloniales (MAG, 1999).



Figura 7.10. Perfil del suelo clasificado como Vitrandic Argiudolls (MIDENA, *et al.*, 2013a).

En esta zona aparecen también suelos poco desarrollados (Entisoles) (Soil Survey Staff, 2006), sin horizontes definidos, que se encuentran indistintamente distribuidos en el área. Estos suelos son producto de la erosión, la intervención del hombre o la deposición reciente de materiales (**Figura 7.11**) (Moreno, *et al.*, 2018).



Figura 7.11. Perfil del suelo clasificado como Typic Ustorthents (MIDENA, *et al.*, 2014).

La erosión antrópica es el proceso que más degrada el suelo en la Sierra ecuatoriana, región considerada como una de las de mayor presión sobre la tierra del mundo (Almeida, *et al.*, 1984; Brassel, *et al.*, 2008). El crecimiento de la población rural ecuatoriana ha obligado a los agricultores a usar tierras marginales para la producción, particularmente tierra de pendientes muy inclinadas de las laderas de la Sierra. Además, también por la presión sobre la tierra, los lotes se han ido dividiendo hasta crear una complicada red de minifundios donde la agricultura está limitada por la escasez de recursos y la mala ubicación de los lotes de producción. La división de la tierra deja en el campo lotes alargados ubicados a favor de la pendiente, condición que promueve la erosión (**Figura 7.12**). La poca disponibilidad de tierra para la agricultura promueve, además, el uso intenso y la utilización de prácticas agrícolas que favorecen la pérdida del suelo. Este es el caso de la práctica de preparar el suelo en el sentido de la pendiente ya sea con bueyes o con tractor (**Figura 7.13**).

Las dos cadenas montañosas que estructuran la Sierra se unen por cordilleras transversales (nudos) formando en su interior hoyas geográficas que constituyen zonas con paisajes de diferente aspecto y climas particulares que van de muy húmedos a muy secos. Las vertientes internas de las hoyas, con pendientes fuertes, son más susceptibles al escurrimiento y arrastre de materiales. La cobertura vegetal sobre el suelo en estas pendientes es intermitente y deja zonas con superficie sin cobertura por el uso de prácticas de labranza que remueven completamente el suelo (Almeida, *et al.*, 1984; Winters, *et al.*, 1998; Barrera, *et al.*, 2008). Cada vez que ocurre un evento de lluvia el proceso erosivo es acelerado (**Figura 7.14**). Sin embargo, es necesario aclarar que la erosión no es patrimonio de los pequeños productores ya que también se presenta con la misma intensidad en propiedades grandes con mal manejo. El riego también ha contribuido activamente al proceso erosivo, tanto en predios pequeños como en las propiedades grandes. Paradójicamente, el riego tan necesario para la producción termina eliminando la capa fértil del suelo, el principal sostén de la producción agrícola. Muy pocos proyectos de riego incluyen las indispensables prácticas de conservación de suelos que harían eficiente y sostenible la inversión en riego (Southgate and Whitaker, 1994; Vanacker, *et al.*, 2003). La preocupación radica entonces en conocer hasta qué punto el proceso erosivo es advertido desde sus orígenes, considerando que la erosión es reconocida como un problema solamente cuándo y dónde ha sido el proceso dominante del desgaste del paisaje y ha reducido claramente el potencial de producción de los predios agrícolas e incidiendo en su aptitud de generación de bienes o servicios ambientales. El efecto nocivo de la erosión es noticia solo cuando las represas se llenan de sedimento, cuando afloran las cangahuas o cuando las lluvias intensas causan inundaciones de las áreas inferiores de la cuenca, acumulando grandes cantidades de sedimento en caminos, edificios y otras obras de infraestructura con el consecuente perjuicio económico y ambiental (Ortiz, 1990; Hillel, 1992; de la Rosa, 2008; Espinosa, 2014; Prat, *et al.*, 2015).

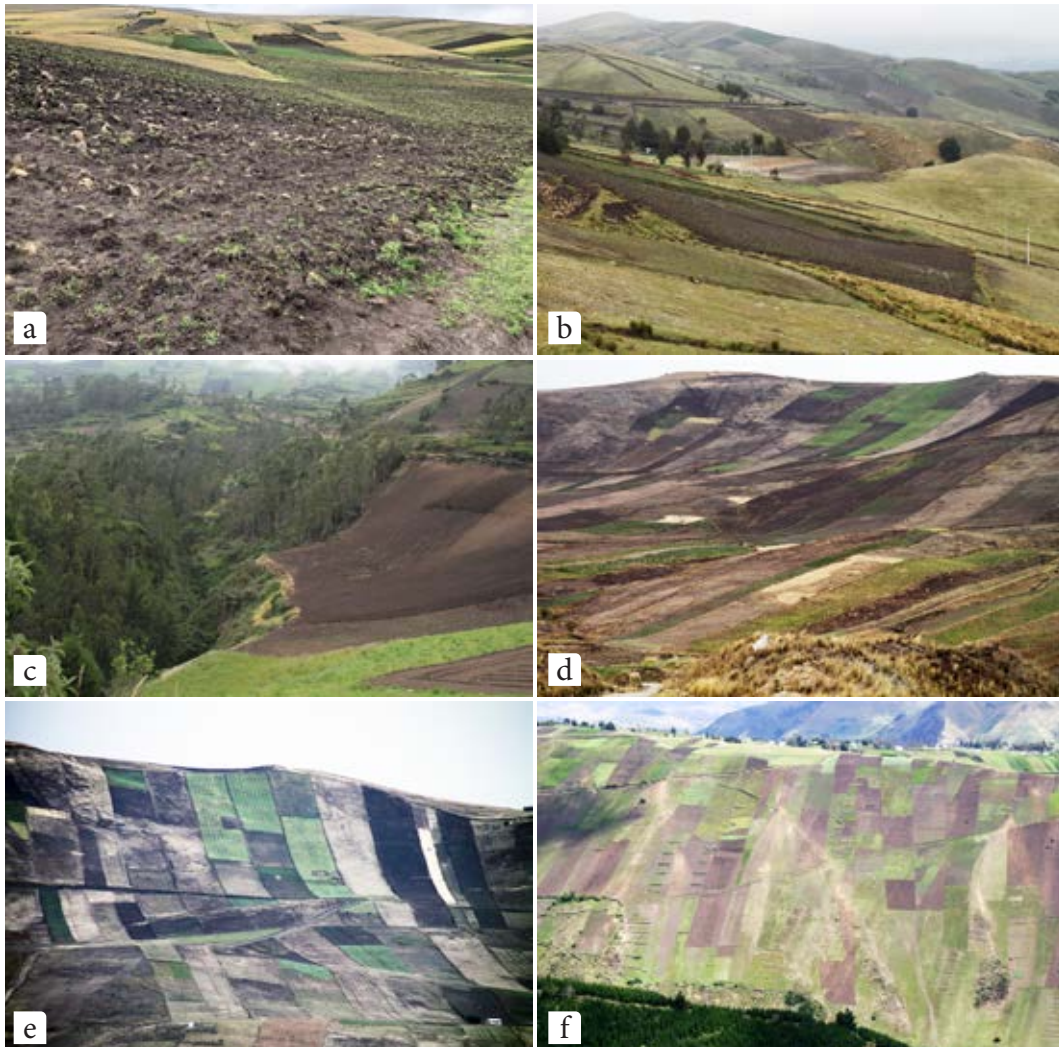


Figura 7.12. Pendientes largas e inclinadas que se han dividido en lotes largos y angostos generando una situación que promueve erosión activa. **a)** Cangahua, Cayambe, Pichincha; **b)** Poaló, Píllaro, Tungurahua; **c)** Químiag, Químiag, Chimborazo; **d)** Cebadas, Guamote, Chimborazo; **e)** Palmira, Guamote, Chimborazo; **f)** Pilahuín, Ambato, Tungurahua.



Figura 7.13. Práctica común de preparar el suelo con tractor en pendientes inclinadas en la Sierra Norte. La labor realizada a favor de la pendiente deja el suelo listo para erosionarse con las primeras lluvias.

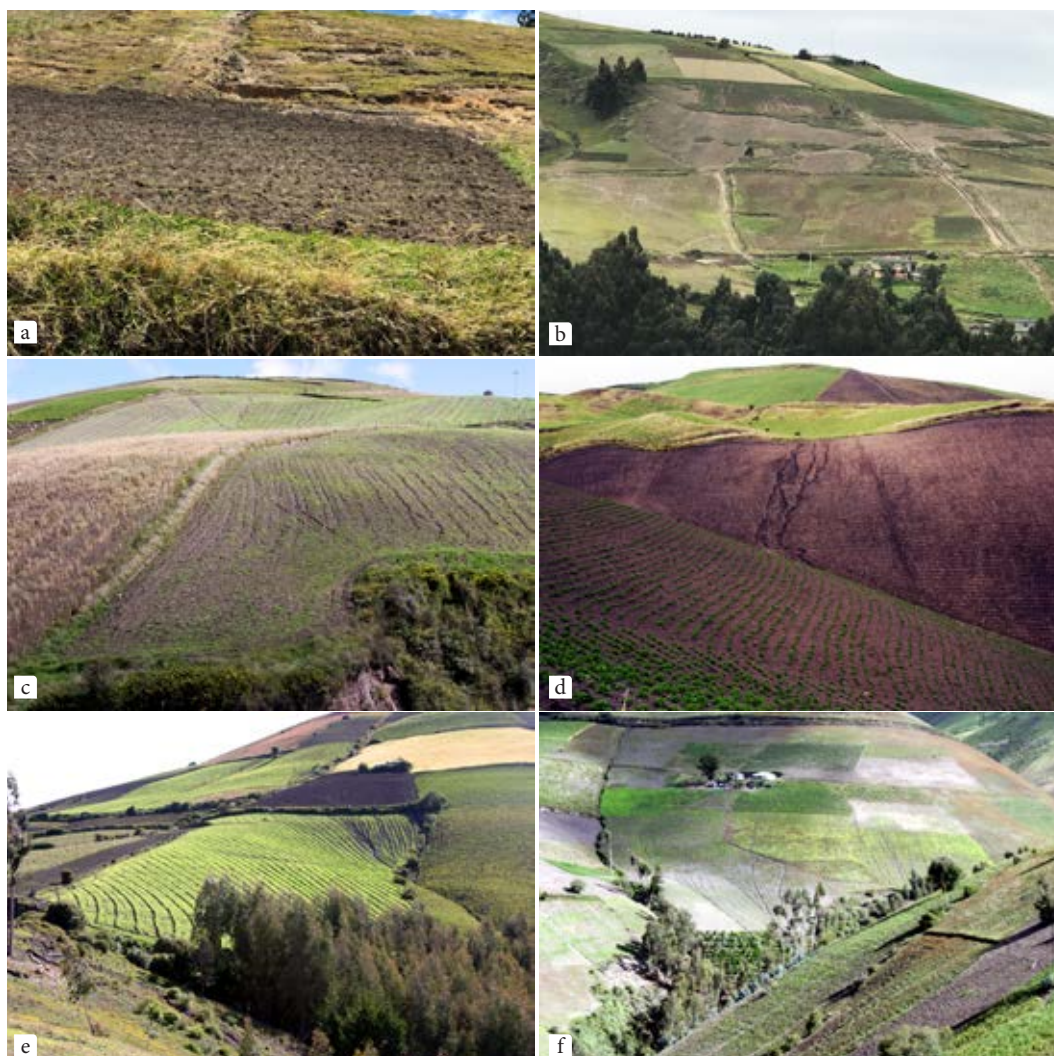


Figura 7.14. Procesos de erosión activa en diversos sitios en la Sierra Norte. **a)** Cangahua, Cayambe, Pichincha; **b)** Otón, Cayambe, Pichincha; **c)** San Miguel, Salcedo, Cotopaxi; **d)** Magdalena, Chimbo, Bolívar; **e)** Urbina, Píllaro, Tungurahua; **f)** Bayushig, Penipe, Chimborazo.

Por otro lado, en las zonas donde la vegetación xerofítica revela bajas precipitaciones (~ 600 mm de promedio anual) se presentan vientos de alta velocidad que fomentan la erosión eólica, proceso que es particularmente evidente en las provincias de Pichincha (San Antonio) y Chimborazo (Palmira). Estas zonas secas coinciden con las áreas cartografiadas de mayor erosión (Ambuquí y San Antonio, Imbabura; Perucho, Pichincha; Ambato, Tungurahua y Palmira, Chimborazo). La **Figura 7.15** muestra el proceso de erosión eólica en Palmira. Antiguamente, las franjas de tierra alrededor de los ríos de estas zonas albergaban grandes bosques de Algarrobos (*Mimosa quitensis*), de Mosquera (*Croton menthondrus*) o espinales de cactus (*Opuntia*, *Cerus*, y *Borzicatus*), pero el mal manejo y deforestación han hecho que estos sitios se transformen en arenales de escasa vegetación que ofrece poca protección contra la erosión. Los severos procesos erosivos en zonas secas contribuyen a la desertificación en la Sierra (Cañadas, 1983; Almeida, *et al.*, 1984; Hidalgo, 1998; Espinosa and Moreno, 2018; Tello, *et al.*, 2019).



Figura 7.15. Proceso de erosión hídrica (izquierda) y proceso de erosión eólica (derecha) en la zona seca de Palmira, Guamote, Chimborazo.

Un alto porcentaje de los suelos de la Sierra Norte son Andisoles (suelos derivados de cenizas volcánicas) que por su naturaleza tienen alta porosidad debido a su baja densidad aparente y altos contenidos de MOS (Zehetner, *et al.*, 2003; Dahlgren, *et al.*, 2004; Nanzyo and Kanno, 2018), condición que hace que el suelo absorba altas cantidades de agua que saturan el suelo y provocan escurrimiento superficial que inicia el proceso erosivo o que provocan deslizamientos en masa comunes en varios sitios de la Sierra. La destrucción de la estructura por laboreo excesivo y/o utilización de maquinaria pesada en suelo húmedo destruye la porosidad y compacta el suelo haciéndolo más susceptible a erosión (Mejía, 1997; Dahlgren, *et al.*, 2004; Lal, 2017).

7.2.1. Cuantificación de la erosión en la Sierra Norte

El estudio más completo sobre la magnitud del proceso erosivo en Ecuador fue publicado por el MAG y la ORSTOM en 1984 (Almeida, *et al.*, 1984). Este estudio determinó que aproximadamente el 47.9 % del país estaba, en ese momento, afectado por problemas erosivos de diferente intensidad (**Cuadro 7.1**). La información obtenida estableció que, en general, la mayor pérdida de suelo por erosión activa y muy activa se produce dentro del callejón interandino y en las vertientes que lo bordean (**Figura 7.4**) (Almeida, *et al.*, 1984; de Noni, *et al.*, 1997), llegando a considerarse que, en aquel tiempo, la erosión era la más grande amenaza que enfrentaba la agricultura de la Sierra (Almeida, *et al.*, 1984; Espinosa y Maldonado, 1987; Espinosa y Mothes, 1991). La información obtenida hasta ese momento indicaba que alrededor del 36 % de la superficie del país, es decir alrededor de 10 000 000 de hectáreas, presentaban potenciales procesos erosivos muy bajos, pero que el mal manejo del suelo podría erosionarlas fácilmente. Los procesos erosivos activos se presentaban en alrededor de 2 000 000 de hectáreas, en tanto que en 333 000 hectáreas existían procesos muy intensos de erosión (Almeida, *et al.*, 1984; Custode, *et al.*, 1999; MAG, 1999).

Cuadro 7.1. Intensidad de los procesos erosivos en el Ecuador durante 1980 (Almeida, *et al.*, 1984).

Intensidad de los Procesos	Porcentajes estimados en relación con la superficie del Ecuador
Muy Activos	1.3
Activos	7.7
Activos y Potenciales	3.1
Potenciales	35.8
Total	47.9

La región Andina ecuatoriana es la zona donde el crecimiento poblacional es mayor y donde se encuentran las cuencas hidrográficas con alta densidad poblacional, a pesar de que estas zonas tienen limitadas posibilidades de extender su frontera agrícola (Villacís, *et al.*, 2011; Asamblea Nacional, 2016). Es

en esta región donde los factores generadores de procesos erosivos son más preocupantes que en la Costa o la Amazonía, debido al efecto decisivo de las precipitaciones y la acción del viento, suelos descubiertos, lotes ocupados por agricultura desarrollada en relieves de montaña con fuertes pendientes y diversos tipos de clima (**Cuadro 7.2**) (Almeida, *et al.*, 1984; Custode, *et al.*, 1999; IGM y IEE, 2008; Espinosa and Moreno, 2018). Esto se puede evidenciar en zonas que llegan a tener entre el 50 y 90 % de sus suelos erosionados con afloramiento de cangahuas (Loza, 1995; Custode, *et al.*, 1999; MAG, 1999; Prat, *et al.*, 2015; MAG, 2017).

Cuadro 7.2. Factores creadores y condicionantes de la erosión en el Ecuador (Loza, 1995).

Regiones	Factores generadores		Factores condicionantes	
	Pluviometría anual	Viento	Topografía	Cobertura vegetal
Costa	Fuertes	Escaso	Media a Fuerte	Buena
Sierra	Bajas o medias	Agresivo en verano	Fuerte a muy Fuerte	Mala
Flancos exteriores de la Sierra	Fuertes	Sin	Fuerte a muy Fuerte	Muy buena en las zonas fuera de las áreas colonizadas
Oriente	Fuertes	Sin	Suave o media	Muy buena fuera de las áreas colonizadas

Si bien era conocido el efecto devastador de la erosión en las tierras altas de Ecuador, también es cierto que no se cuenta con información sobre la dinámica y forma de dispersión de la pérdida de suelo a través de los años. Con este antecedente, Haro (2020) procesó la geoinformación existente para determinar el estado actual del proceso erosivo en la Sierra Norte del Ecuador, tomando como punto de partida la información generada por Almeida, *et al.* (1984) y de Noni (1986). El estudio se condujo en una sección de la Sierra Norte que se extiende desde la frontera colombiana, al norte, hasta aproximadamente la latitud de 2°30' S a la salida del valle de Alausí-Chunchi, cubriendo una superficie 1 557 587 hectáreas. Como primer paso se obtuvo el mapa de los principales procesos erosivos del Ecuador de 1984, a mayor detalle, el cual se comparó con el mapa elaborado con la información obtenida del procesamiento y digitalización de imágenes Landsat 2017, logrando cuantificar las áreas con grados de erosión severo, moderado y ligero, en ambos mapas (**Figuras 7.16** y **7.17**). En el **Cuadro 7.3** se presentan las áreas de diferente grado de erosión en 1986 y 2017, observándose que las superficies erosionadas de los grados ligero y severo se incrementaron en este periodo de tiempo, mientras que la superficie con erosión de grado moderado se redujo.

Cuadro 7.3. Cambios en los grados de erosión entre 1986 y 2017 en la Sierra Norte (Haro, 2020).

Año	Grado de erosión (ha)			
	Ligera	Moderada	Severa	Total
1986	409 353	59 389	4 760	473 502
%*	26.3	3.8	0.3	30.4
2017	540 654	41 280	142 541	724 475
%	34.7	2.7	9.1	46.5

* Los porcentajes están en función de la superficie del área evaluada: 1 557 588 ha.

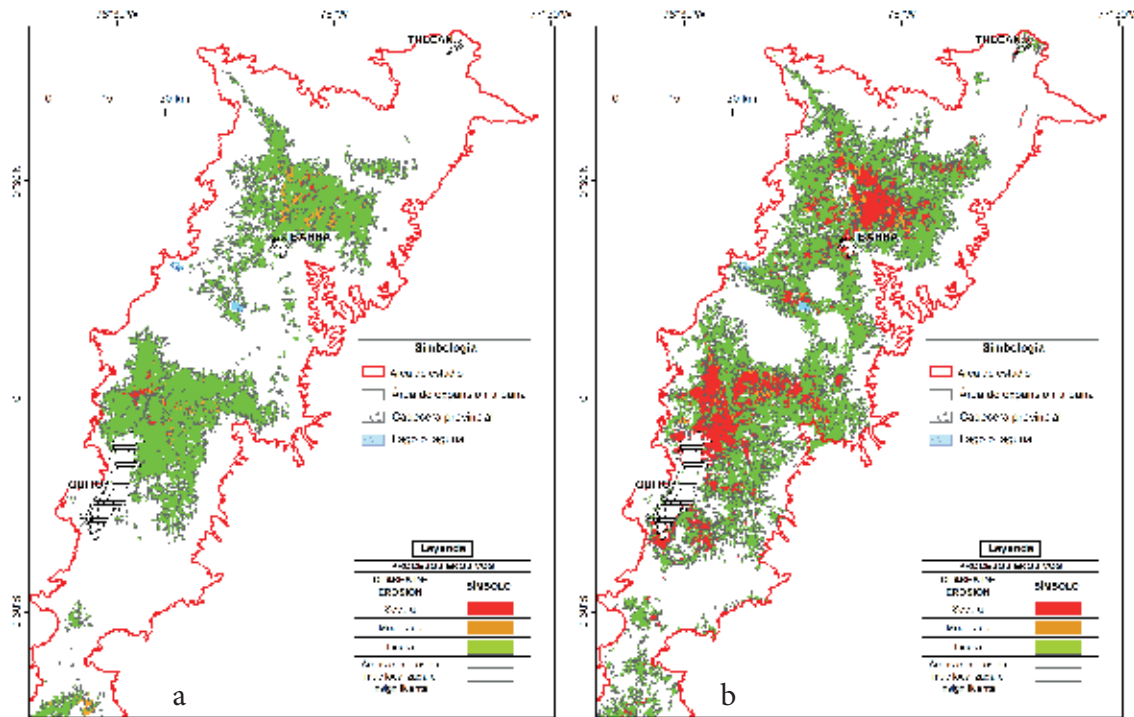


Figura 7.16. Comparación del cambio en los grados de erosión en la zona norte del área evaluada: a) 1986 y b) 2017 (Haro, 2020).

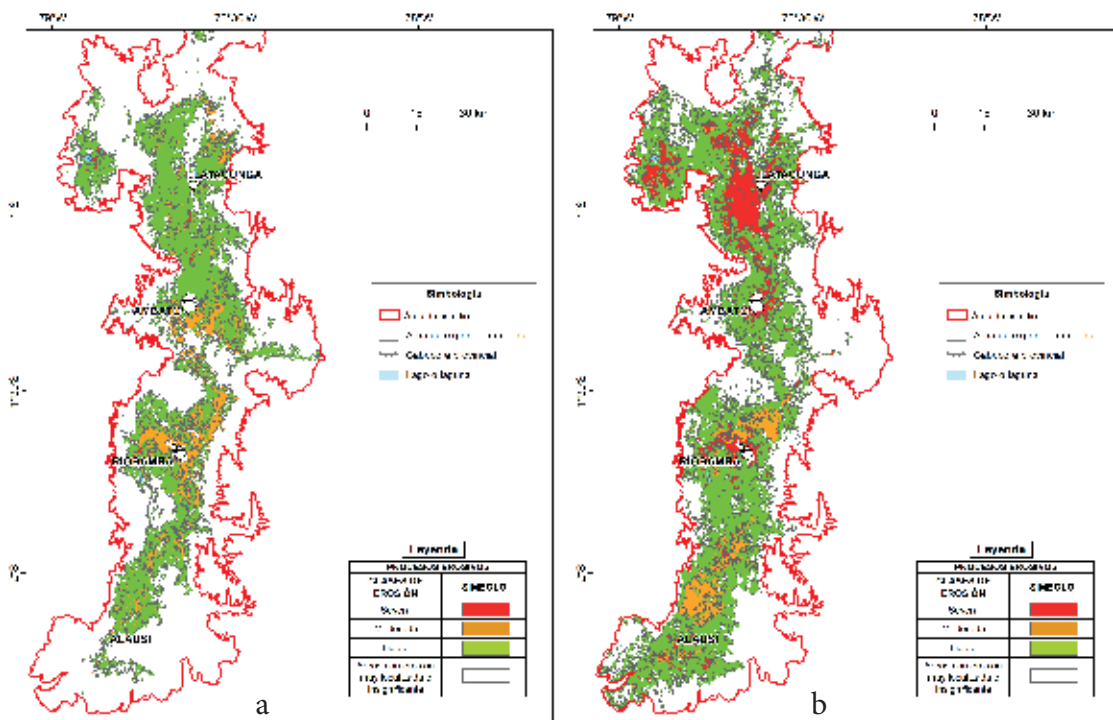


Figura 7.17. Comparación del cambio en los grados de erosión en la zona sur del área evaluada: a) 1986 y b) 2017 (Haro, 2020).

La descripción detallada de los cambios en superficie y severidad de los procesos erosivos de la zona estudiada en el periodo 1986 y 2017 se presenta en el **Cuadro 7.4**. Se puede observar que los cambios más representativos corresponden a la erosión ligera y severa en las provincias de Cotopaxi, Chimborazo y Pichincha, mientras que en las de Tungurahua, Carchi y Cotopaxi se observa una reducción representativa en la erosión moderada, pero un incremento en la superficie con erosión severa.

Cuadro 7.4. Cambios en la superficie y la severidad de la erosión del periodo 1986 y 2017 a nivel provincial (Haro, 2020).

Grado de Erosión	Provincia	1986	2017
		Superficie (ha)	
Ligero	Carchi	20 457	38 653
	Cotopaxi	94 193	103 827
	Chimborazo	90 439	160 155
	Imbabura	50 395	75 019
	Pichincha	97 057	107 834
	Tungurahua	56 813	55 166
	Total	409 354	540 654
Moderado	Carchi	1 253	773
	Cotopaxi	7 270	3 515
	Chimborazo	29 981	29 774
	Imbabura	3 006	3 865
	Pichincha	2 500	2 974
	Tungurahua	15 379	380
	Total	59 389	41 281
Severo	Carchi	691	7 129
	Cotopaxi	1 227	40 197
	Chimborazo	177	14 514
	Imbabura	354	20 126
	Pichincha	2 076	51 510
	Tungurahua	235	9 065
	Total	4 760	142 541
	Total general (ha)	473 503	724 476
	%*	30.4	46.5

* Los porcentajes están en función de la superficie del área evaluada: 1 557 588 ha.

Los cambios en la superficie y severidad de la erosión documentados en la Sierra Norte han sido promovidos por diferentes factores, pero particularmente por el hecho de que casi toda la tierra se puede utilizar en agricultura, aun aquella con serias limitaciones de modo que solo quedan sin uso pequeñas áreas con pendientes muy inclinadas (> 70 %). Aparentemente, la necesidad de utilizar la tierra para subsistir ha hecho que los agricultores hayan olvidado las bases del antiguo equilibrio entre producción y consumo establecido por las comunidades precoloniales, sin embargo, es claro que las relaciones actuales entre el hombre y la naturaleza se plantean en términos de lucha y adversidad por subsistir, con poca actitud conservacionista, convirtiendo de esta forma a la erosión en uno de los aspectos de mayor relevancia en la degradación de los recursos naturales y en particular del suelo de la Sierra Norte (de Noni, 1986; IICA-PROCIANDINO, 1995; Espinosa and Moreno, 2018).

En muchos sitios se ha llegado a considerar que la erosión es un fenómeno natural, tan natural como la lluvia misma, porque en suelos con horizontes superficiales profundos era fácil borrar la huella de la erosión con la labranza, sin percatarse que con esta acción se estaban perdiendo enormes cantidades de suelo, pérdidas que finalmente se hicieron evidentes con las grandes áreas de la Sierra Norte donde han aflorado las cangahuas (Espinosa, 1981; Dercon, *et al.*, 2007; Espinosa, 2014). Por otro lado, el rápido crecimiento poblacional trae como consecuencia una alta demanda de uso del suelo para asentamientos, pueblos y ciudades tomando tierra agrícola, con el consecuente incremento de la presión sobre la tierra para producir alimentos. La población ecuatoriana creció de 9.29 millones en el año 1986 a 16.8 millones en el 2017 (Eglitis Media, 2021), cifras que se relacionan directamente con el aumento poblacional en la Sierra Norte y el evidente incremento en erosión en ese periodo de tiempo en esa zona del país. Las obras de infraestructura necesarias para la construcción de vivienda e infraestructura de acceso sellan los suelos e incrementan la escorrentía haciendo más severo el proceso erosivo, aumentando los efectos colaterales de la pérdida del suelo (Cortés, 2004; Tello, *et al.*, 2019).

Las condiciones de clima de las zonas altas del trópico, como las prevalentes en la Sierra Norte de Ecuador, permiten producir todo el año si se puede satisfacer las necesidades de agua de los cultivos en las épocas secas. La adopción y uso eficiente del riego mejora los rendimientos, disminuye el riesgo a la erosión y abre la posibilidad de diversificar la producción. Sin embargo, el riego mal utilizado es una de las actividades agrícolas que fomenta el proceso erosivo. El sistema de riego dominante en la Sierra es el riego por gravedad o inundación (más del 90 % de la superficie regada), a pesar de sus limitaciones por mayor consumo de agua y potencial de erosión cuando se utiliza en áreas con pendiente (Winters, *et al.*, 1998; Zapatta y Gasselín, 2005; Gaybor, 2018). El desarrollo de la tecnología en los últimos años ha puesto a disposición de los pequeños productores equipos de riego por aspersión y goteo a precios razonables que hoy se utilizan aprovechando la diferencia de presión generada por la pendiente, pero el riego por aspersión en lotes inclinados tiene todavía un alto potencial de causar problemas por erosión. Además, el riego mal utilizado puede generar problemas de salinización y sodificación que pueden destruir la capacidad productiva del suelo.

7.2.2. Cangahua

La cangahua es un estrato subsuperficial del perfil del suelo formado por tobas volcánicas que provinieron de la deposición, removilización, meteorización y endurecimiento de flujos de lodos compuestos por materiales piroclásticos lanzados por erupciones volcánicas que finalmente se consolidaron a diferentes profundidades en capas de material fino de color caqui anaranjado. La cangahua está compuesta principalmente de vidrio volcánico alterado y otros minerales volcánicos tales como plagioclasa, hornblenda, clinopiroxeno, ortopiroxeno, magnetita, biotita, feldespato-K y cuarzo. Estas tobas volcánicas se endurecieron por acción combinada de agentes cementantes como los carbonatos, por el llenado de los poros con arcillas, sílice y óxidos de hierro y por la acción de períodos climáticos secos. Las tobas volcánicas que formaron las cangahuas se esparcieron en lo que hoy son las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo, entre los 2 000 y 3 200 m s. n. m. en las estribaciones internas del callejón interandino (Maldonado, *et al.*, 1984; de Noni, *et al.*, 1992; Vera y López, 1992; Hall y Mothes, 1997; Zebrowski, 1997). Estos estratos fueron luego cubiertos por cenizas volcánicas, material que con el paso del tiempo formó un suelo fértil de buenas condiciones para la producción agrícola. La presión sobre la tierra, las pendientes pronunciadas del terreno y el mal manejo del suelo promovieron la severa erosión de la capa superficial proveniente de ceniza volcánica dejando expuesta la cangahua (de Noni, *et al.*, 1992; de Noni y Trujillo, 1999a; Espinosa, 2014; Prat, *et al.*, 2015).

Estudios conducidos en la década de 1990 estimaron, con las herramientas tecnológicas disponibles en ese tiempo, que la cangahua estaba presente en una superficie aproximada de 240 000 hectáreas y que el área con exposición de cangahua a la superficie era mayor a 80 000 hectáreas en áreas localizadas en zonas de minifundio con alta concentración poblacional en la Sierra Norte (de Noni, *et al.*, 1992; Zebrowski, 1997; de Noni y Trujillo, 1999a). Con el apoyo de nueva tecnología, los estudios de Jiménez, *et al.* (2016) y Metzler, *et al.* (2016) obtuvieron información regional sobre la presencia de cangahua en varios cantones de provincias de la Sierra Norte que sirvió de insumo para el estudio conducido por Jiménez, *et al.* (2018)

que identificó con precisión las áreas donde se localiza la cangahua aflorante (expuesta en la superficie) y la cangahua ubicada hasta 60 cm bajo la superficie del suelo. La utilización de sensores remotos, imágenes aéreas ortorrectificadas, imágenes satelitales de alta resolución espacial, información cartográfica de libre acceso y un intenso programa de verificación en el campo permitió desarrollar el mapa de cangahuas en el Ecuador a escala 1: 25 000 con información detallada sobre la superficie total y la distribución de la cangahua en el país (Figura 7.18).

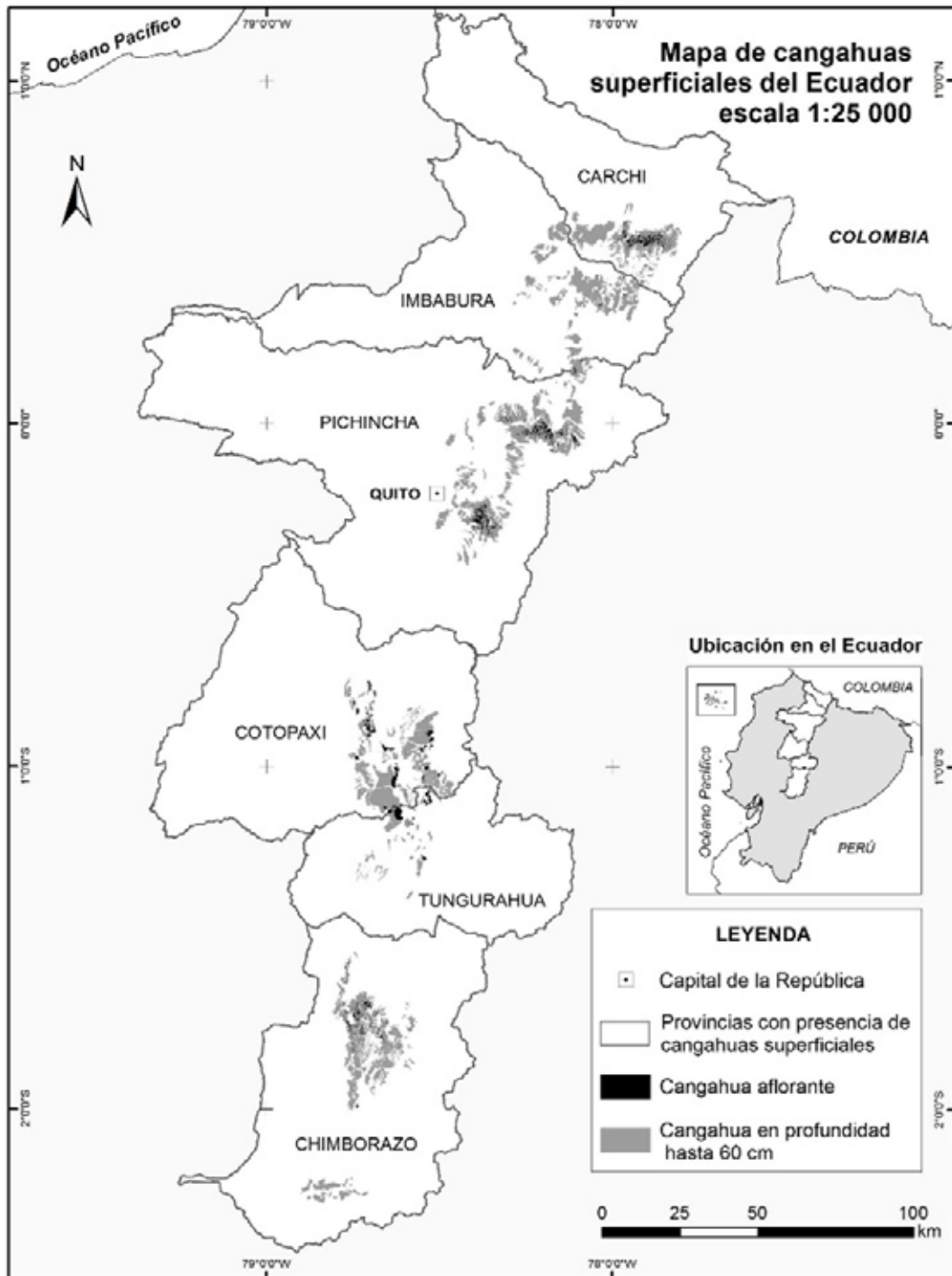


Figura 7.18. Distribución general de la cangahua aflorante y en profundidad de hasta 60 cm a nivel provincial en el Ecuador (Jiménez, *et al.*, 2018).

Las cangahuas superficiales se localizan en las vertientes de los volcanes de la Sierra Norte ubicadas en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo en zonas asociadas a la actividad volcánica del período Cuaternario y su presencia cerca o en la superficie fue promovida por procesos de erosión (**Cuadro 7.5** y **Figura 7.19**). El área total de cangahuas superficiales en el país es de 181 487 hectáreas, de las cuales 13 162 corresponden a cangahua aflorante y 168 325 a cangahua en profundidad hasta 60 cm (Jiménez, *et al.*, 2018).

Cuadro 7.5. Distribución provincial de la cangahua aflorante y en profundidad de hasta 60 cm a nivel provincial (Jiménez, *et al.*, 2018).

Provincia	Cangahua aflorante	Cangahua en profundidad hasta 60 cm	Total provincial
	----- ha -----		
Carchi	2 207	21 743	23 950
Chimborazo	1 807	34 721	36 528
Cotopaxi	3 659	32 655	36 314
Imbabura	152	26 985	27 137
Pichincha	3 795	46 130	49 925
Tungurahua	1 542	6 091	7 633
Total Nacional	13 162	168 325	181 487

Los rangos de altitud de las áreas donde se encuentran las cangahuas se presentan en el **Cuadro 7.6**. La cangahua aflorante está localizada entre los 1 470 y 3 650 m s. n. m. y la cangahua en profundidad se localiza entre los 1 300 y 4 000 m s. n. m. Por otro lado, del área total, 4 397 hectáreas (3 %) se encuentran en zonas relativamente bajas desde 1 300 a 2 000 m s. n. m., 130 651 (72 %) se ubican entre los 2 000 a 3 200 m s. n. m. y solamente 2 452 (1 %) corresponden a las zonas en el rango de 3 600 a 4 100 m s. n. m. Reportes anteriores indicaban que la cangahua se ubicaba entre 2 500 a 3 200 m s. n. m. (de Noní et Viennot, 1994), sin embargo, la reportada presencia de cangahua a mayor altitud es una clara evidencia de la reciente erosión promovida por el crecimiento de la frontera agrícola hacia los páramos (Jiménez, *et al.*, 2018).

Cuadro 7.6. Distribución de las cangahuas según la altitud (Jiménez, *et al.*, 2018).

Rango de altitud	Cangahua aflorante	Cangahua en profundidad hasta 60 cm	Subtotal	Porcentaje
	----- ha -----			
m s. n. m.				
1 300 - 2 000	44	4 353	4 397	3
2 000 - 3 200	9 264	121 387	130 651	72
3 200 - 3 600	3 739	40 248	43 987	24
3 600 - 4 000	115	2 337	2 452	1
Total	13 162	168 325	181 487	100

La dureza de la cangahua impide la retención de agua y la penetración y desarrollo de raíces, por esta razón, pocas plantas crecen en los eriales de cangahua expuesta y la actividad agrícola tiene severas limitaciones en las zonas donde la cangahua se encuentra a poca profundidad (**Figuras 7.19e** y **7.19f**). El habilitar la cangahua para uso agrícola es entonces un imperativo social que debe satisfacerse con innovación tecnológica. Este sería un aporte positivo para promover entre los campesinos una agricultura eficiente y amigable con el ambiente que permita asegurar la alimentación y genere recursos económicos para la población.

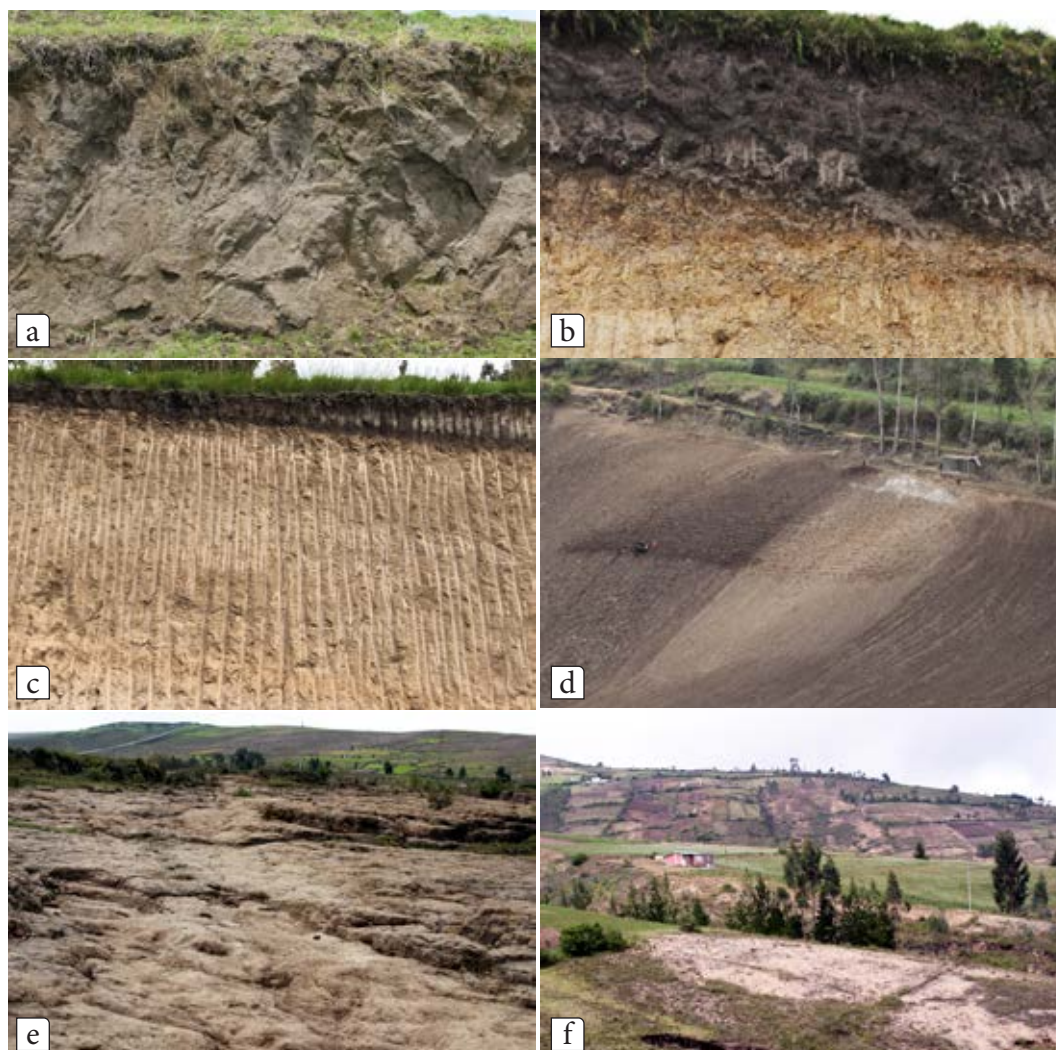


Figura 7.19. Profundidad de la cangahua en varios sitios de la Sierra Norte. **a)** Capa profunda de suelo volcánico sobre cangahua a 3 100 m s. n. m., Aláquez, Latacunga, Cotopaxi; **b)** Capa de suelo volcánico de > 1 m de profundidad sobre cangahua, Otón, Cayambe, Pichincha; **c)** Capa delgada (< 0.6 m) de suelo volcánico sobre cangahua que se ha perdido por erosión, Cangahua, Cayambe, Pichincha; **d)** Afloramiento de cangahua por intenso proceso de erosión promovido por labranza mecanizada, Quimiag, Riobamba, Chimborazo; **e)** Zona de afloramiento de cangahua luego de un largo y activo proceso de erosión en Bolívar, Bolívar, Carchi; **f)** Zona con cangahua superficial luego de la pérdida de suelo por erosión promovida por mal manejo del suelo, Latacunga, Latacunga, Cotopaxi.

Varios trabajos de habilitación de cangahuas se condujeron en la década de 1990 en proyectos que removieron el material endurecido de forma manual, con tractor, reforestación y siembra de frutales (Cangás y Trujillo, 1997; Terán, 1997; Trujillo y Arias, 1997; Zebrowski y Sánchez, 1997; Poulénard, *et al.*, 2001). La mayoría de estos proyectos no se mantuvieron en el campo con el apoyo pertinente y se perdieron nuevamente por la erosión del material recuperado y los resultados finales de la recuperación no fueron satisfactorios.

Un nuevo esfuerzo para habilitar cangahua y transformarla en suelo productivo se inició en el año 2012 en un trabajo conjunto entre el MAGAP, FAO, Universidad Central del Ecuador y varios gobiernos seccionales de la Sierra Norte (Taruchaín, 2020). El trabajo consiste en romper la cangahua con maquinaria hasta alrededor de un metro de profundidad para crear un soporte físico para las plantas. El bajo contenido de nutrientes esenciales, particularmente nitrógeno y fósforo, en el material inicialmente rehabilitado restringe el crecimiento de las plantas, lo que no permite generar suficientes residuos orgánicos que promuevan la actividad microbiana y la acumulación de carbono orgánico (CO). Por esta razón, los cultivos sembrados inmediatamente después de la ruptura de la cangahua producen rendimientos dramáticamente bajos (**Figura 7.20**).



Figura 7.20. Cultivos de pobre crecimiento y rendimiento sembrados inmediatamente después de la ruptura de la cangahua. Los sitios están localizados en la comuna Porotog (cebada, izquierda) y la comuna Buena Esperanza de Guachalá (maíz, derecha) en la parroquia Cangahua, cantón Cayambe.

En este punto del proceso es importante establecer una estrategia de manejo que enriquezca el material producto de la ruptura de la cangahua con nutrientes esenciales y CO hasta rehabilitarlo y convertirlo en suelo fértil que permita alcanzar una producción sostenible de los cultivos. El manejo se inicia incorporando primero residuos orgánicos y fertilizantes minerales para luego sembrar leguminosas y pastos que se incorporan como abono verde buscando desarrollar la matriz de suelo que permita sembrar cultivos tradicionales de la zona y cultivos nuevos de mayor valor. Se espera que este procedimiento de habilitación de la cangahua permita producir rendimientos adecuados de trigo y fréjol en tres años y maíz en cinco (Hidrobo, *et al.*, 2015; Prat, *et al.*, 2015; Taruchaín, 2020). En los sitios donde se puede incorporar riego presurizado se pueden incluir una variedad más amplia de cultivos, algunos de buena rentabilidad como flores y frutales (Foubert, 2015; Taruchaín, 2020). Algunas facetas del proceso de habilitación de cangahua se presentan en la **Figura 7.21**.

La posibilidad de acumular CO durante el proceso de habilitación de la cangahua puede jugar un interesante papel en la captura de carbono a nivel local. Se considera que en el proceso de habilitación desde la ruptura del material endurecido hasta la estabilización del nuevo suelo se podrían capturar entre 40 y 90 t ha⁻¹ de carbono de la atmósfera (Prat *et al.* 2015). Por otro lado, es importante considerar que la incorporación de las zonas erosionadas donde ha aflorado cangahua permitiría reducir la presión sobre la tierra evitando la utilización de los páramos sobre 3 200 m s. n. m. para agricultura. Los páramos son una importante reserva de carbono y agua que debe conservarse para beneficio de toda la población (Podwokewski and Poulénard, 2011).

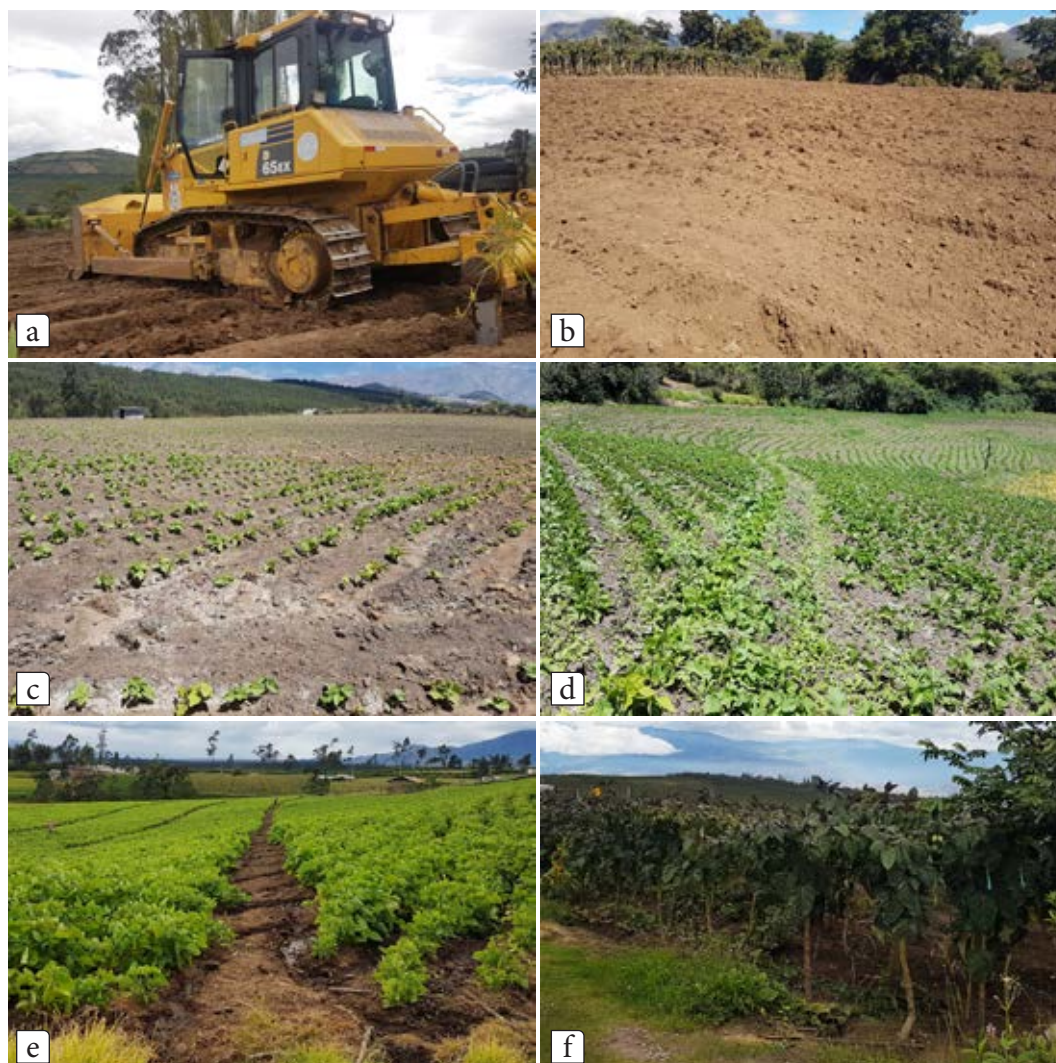


Figura 7.21. Proceso de habilitación de cangahua en el cantón Urcuquí, Imbabura. **a)** Maquinaria roturando cangahua hasta una profundidad aproximada de un metro, parroquia Cahuasquí; **b)** Lote de 20 % de pendiente un año después del roturado donde todavía se observan bloques grandes de cangahua, parroquia Cahuasquí; **c)** Lote con 5 años en proceso de habilitación, 15 % de pendiente, donde no se han utilizado técnicas de conservación y la cangahua ha aflorado nuevamente, parroquia San Blas; **d)** Lote con dos años de proceso de habilitación, 15 % de pendiente, sembrado en curvas de nivel para evitar la erosión, todavía se observan pequeños bloques de cangahua, parroquia de Pablo Arenas; **e)** Lote con cinco años de habilitación, 20 % de pendiente, cultivada con fréjol, parroquia de Pablo Arenas; **f)** Lote de tres años de habilitación cultivado con tomate de árbol donde se han utilizado técnicas de conservación de suelo desde el inicio del proceso, parroquia Pablo Arenas. Fotos Alex Taruchaín.

7.3. Erosión en la Sierra Centro y Sierra Sur

La Sierra Centro y la Sierra Sur se caracterizan por la ausencia volcanes y de recubrimientos piroclásticos recientes y en ambas los relieves empinados de las zonas altas de las vertientes internas de las cordilleras se van suavizando al pasar por la zona media hasta entrar en contacto con los pisos planos u ondulados de las cuencas inferiores. En general, estas condiciones de relieve generan una gradiente climática que se caracteriza por recibir altas precipitaciones en las zonas altas que gradualmente van reduciéndose hasta generar zonas secas de baja precipitación. Los suelos de las partes altas de la Sierra Norte son ferralíticos-fersialíticos, en las partes intermedias son moderadamente evolucionados con características móllicas o vérticas y en las zonas bajas los suelos son poco evolucionados con predominio de vertisoles. Por otro lado, los suelos de altura de

la Sierra Sur son fersialíticos saturados, en la zona media son paleosuelos ferralíticos desaturados y en las zonas bajas predominan vertisoles rodeados por paleosuelos fersialíticos (Zebrowski y Sourdat, 1997). Las características particulares de estos suelos hacen que los procesos erosivos sean diferentes a los dominantes en la Sierra Norte.

En estas zonas de la Sierra, la intensidad de lluvia es el principal factor que desencadena los procesos erosivos que se inician con escurrimiento superficial, pero cuando la escorrentía y la infiltración actúan conjuntamente se producen movimientos de masa que ocasionan severos procesos de erosión, particularmente en las zonas altas y medias de las estribaciones de la cordillera. En las áreas secas y semiáridas de la parte baja de las estribaciones se presentan también procesos de erosión acelerada, debido a que los suelos tienen cobertura vegetal discontinua por el crecimiento escaso de la vegetación o por la sobreutilización del suelo para cultivos. Aun cuando la precipitación es baja, ésta se concentra en eventos de lluvias de intensidad media a fuerte que provoca severos procesos de erosión hídrica y eólica en suelos desprotegidos. Almeida *et al.*, definieron en 1984 las diferentes facetas de los procesos erosivos de la Sierra Centro y Sierra Sur y cuantificaron las áreas afectadas en ese momento (**Figura 7.22**); sin embargo, las fotografías que acompañan esta descripción fueron obtenidas por el proyecto Levantamiento de Cartografía Temática, escala 1: 25 000, coordinado por MAGAP-SIGTIERRAS (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015a).

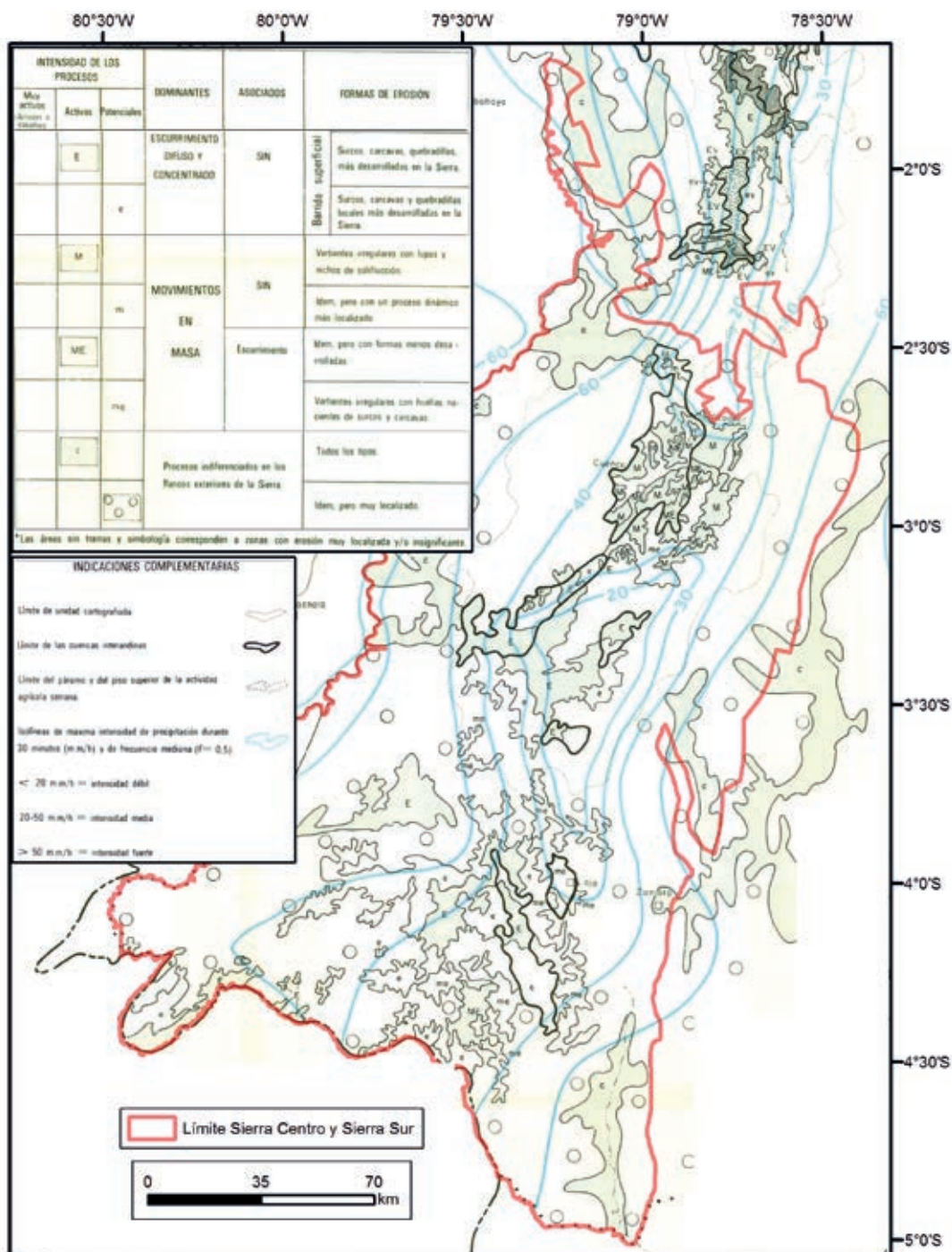


Figura 7.22. Mapa de los principales procesos erosivos en la Sierra Centro y Sierra Sur del Ecuador (Adaptado de Almeida *et al.*, 1984).

7.3.1. Principales procesos erosivos de la Sierra Centro y la Sierra Sur

7.3.1.1. Esgurrimiento difuso y concentrado activo (E)

Los procesos erosivos causados por los escurrimientos difuso y concentrado se presentan en las áreas identificadas con la letra E en la Figura 7.22. El escurrimiento difuso es difícil de precisar ya que es casi

imperceptible a simple vista y se presenta en forma de hilos de agua que tienden a conectarse y solamente se desplazan sobre la superficie del suelo sin poder penetrar. Cuando estos hilos de agua logran penetrar la superficie del suelo (generalmente en pendientes $> 20\%$) se forman pequeños surcos de escurrimiento concentrado de poca profundidad que luego forman cárcavas y quebradillas cuya profundidad varía desde pocos cm a más de un metro, e incluso se llegan a formar quebradas de varios metros de profundidad (**Figuras 7.23 y 7.24**).



Figura 7.23. Escurrimiento difuso y concentrado con formación de quebradillas y cárcavas en relieves con pendientes fuertes (40 al 70 %) de la Formación Saraguro, localizado en la parroquia San Sebastián de Yuluc, cantón Saraguro, provincia de Loja (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015g).



Figura 7.24. Escurrimiento difuso y concentrado en surcos, cárcavas y quebradillas en una vertiente con pendiente media a fuerte (25 a 40 %) de la Formación Saraguro, localizada en la parroquia Nabón, cantón Nabón, provincia de Azuay (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015f).

El escurrimiento difuso se encuentra siempre asociado al escurrimiento concentrado que aparece cuando aumenta la pendiente y la precipitación (la intensidad mínima de lluvia que puede originar escurrimiento superficial es de 10-15 mm h⁻¹). Este tipo de proceso erosivo se localiza en el contorno de las cuencas de Nabón, Saraguro, Santa Isabel y Loja, y afecta las vertientes que rodean las cuencas. El fondo de las cuencas puede ser afectado también por escurrimiento cuando las colinas son onduladas. La superficie de la Sierra Centro y Sierra Sur es de 34 819 km² y en 1984 se determinó que las áreas afectadas con este proceso erosivo eran de aproximadamente el 6 % de la superficie total.

7.3.1.2. *Esgurrimiento difuso y concentrado potencial (e)*

Estas zonas poseen características similares a E, pero solamente tienen un riesgo potencial de que aparezcan procesos erosivos. Se consideraba que con la presión sobre la tierra derivada del crecimiento poblacional habría que prestar atención a aquellos sectores agrícolas donde existen prácticas de labranza (manual o mecanizada) en sentido de la pendiente. Además, se debe considerar el papel depredador de la ganadería ovina y caprina con rebaños apreciables, que dejan el suelo sin protección vegetal. Este tipo de condición afectaba al 9 % de área total (**Figura 7.22**).

7.3.1.3. *Movimientos en masa activos (M)*

Estos procesos erosivos se encuentran localizados sobre relieves colinados y suelos arcillosos cubiertos de pastizales (**Figura 7.22**). El perfil topográfico de las vertientes es irregular a causa de las lupas y de los nichos de solifluxión (desplazamiento por gravedad masivo y lento de masas voluminosas de suelo promovido por la plasticidad y fluidez de las arcillas cuando se saturan con agua). Estos fenómenos son frecuentes en todas las zonas cubiertas por pastizales donde el pisoteo de los bovinos en relieves con pendiente, a veces pronunciada, favorece el desencadenamiento de movimientos en masa (**Figura 7.25**). En muchos sitios no es raro encontrar deslizamientos de vertientes enteras sobre el contacto del suelo con formaciones rocosas superficiales (**Figura 7.26**). Representaban el 2 % de área total en la Sierra Centro y Sierra Sur.



Figura 7.25. Procesos de erosión por movimientos en masa activos en una vertiente empinada de la Formación Biblián (pendiente 40 al 70 %), localizada en la parroquia Zhimad, cantón Gualaceo, provincia de Azuay (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015i).



Figura 7.26. Procesos de erosión por movimientos en masa activos en una vertiente heterogénea (pendiente del 40 al 70 %), localizada en la parroquia Chuquipata, cantón Azogues, provincia de Cañar (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015h).

7.3.1.4. Movimientos en masa potenciales (m)

Estas zonas presentan características muy similares a la categoría **M**, pero que presentan movimientos en masa muy localizados o poco activos debido a que las pendientes son menos pronunciadas que raramente sobrepasan el 40 % (**Figura 7.22**). Solamente representaban el 0.2 % de área total. Un ejemplo es la zona situada en el extremo norte de la ciudad de Cuenca.

7.3.1.5. Movimientos en masa y escurrimiento activos (ME)

Este tipo de procesos presentan características muy similares a aquellas de **E** y **M** en el mapa de la **Figura 7.22**. En estas zonas las vertientes son menos irregulares, están generalmente ocupadas por pastizales y la intensidad de la erosión es menos severa. Un ejemplo son las áreas localizadas al sureste de la ciudad de Cuenca que se encuentran alternando con los movimientos en masa predominantes (**Figura 7.27**). Representaban el 1 % de área total.

7.3.1.6. Movimientos en masa y escurrimiento concentrado potenciales (me)

Estos procesos podrían afectar a zonas sensibles como aquellas cubiertas con pastizales y con cultivos irrigados. La sobrecarga animal y la saturación del suelo por abuso del agua de irrigación favorecen el sellamiento superficial del suelo con una capa de arcillas reacomodada en forma horizontal que no permite la infiltración y promueve el escurrimiento (**Figura 7.28**). Cubrían el 4 % del área total.

7.3.1.7. Procesos indiferenciados activos (c)

Estos procesos erosivos ocurren en los flancos de la cordillera donde se realiza actividad agrícola. Se trata de áreas de producción localizadas en ambos lados de los ejes de comunicación cultivadas con pastizales, cultivos de subsistencia y bosques. Aquí se producen movimientos en masa en los suelos arcillosos, escurrimiento difuso

y concentrado en los suelos arenosos y limosos de origen granítico y movimientos de gravedad en las pendientes más fuertes (**Figura 7.29**). Representaban el 7 % de área ocupada por la Sierra Centro y La Sierra Sur.

7.3.1.8. *Procesos indiferenciados potenciales (círculos pequeños)*

Corresponden a potenciales procesos erosivos que podrían presentarse en los flancos de la cordillera donde no debería existir actividad agrícola y que deben mantener el medio natural forestal. Los relieves son muy fuertes que generalmente tienen pendientes abruptas de 70 a 100 %. Es un medio natural frágil en equilibrio, pero el desmonte exagerado y las fuertes precipitaciones provocan procesos erosivos catastróficos como el deslizamiento de tierra sobre las vertientes inestables.



Figura 7.27. Procesos de erosión por movimientos en masa y escurrimiento activos en una superficie de chevrón de la Formación Yunguilla, localizada en la parroquia Quingeo, cantón Cuenca, provincia de Azuay (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016e).



Figura 7.28. Zona con riesgo de erosión por movimientos en masa y escurrimiento concentrado en un relieve colinado alto con pendiente fuerte (40 al 70 %), localizado en la parroquia Fundochamba, cantón Quilanga, provincia de Loja (MIDENA, *et al.*, 2012).



Figura 7.29. Procesos indiferenciados activos (de todo tipo) en un relieve montañoso de la Formación Macuchi, con pendiente muy fuerte (70 a 100 %), localizado en la parroquia Ducur, cantón Cañar, provincia de Cañar (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016d).

7.3.2. Avance de la erosión en la Sierra Centro y Sierra Sur

La presión sobre la tierra derivada del crecimiento poblacional de las últimas décadas ha incrementado la pérdida de suelo por erosión a tasas mucho mayores que las previstas por Almeida *et al.* (1984), siendo más visibles en los flancos altos y medios de la cordillera y en las cuencas y valles inferiores. La extensiva tala de bosque para liberar áreas para cultivos y pastizales deja el suelo desprotegido y los potenciales procesos erosivos descritos para la región empezaron a ser más evidentes (Peters, *et al.*, 2013; Ochoa, *et al.*, 2016). Este cambio se evidencia en la **Figura 7.30** que muestra dos imágenes satelitales de una superficie que abarca 980 km² en los límites entre Azuay y Loja tomadas en los años 1986 y 2020. En la imagen de 1986 se observa que el 30 % de la superficie estaba afectada por erosión, mientras que en el año 2020 los procesos erosivos activos ascendieron al 70 % de área observada. Los procesos erosivos provocados por la acción antrópica son exacerbados por la caída de fuertes y concentradas precipitaciones que desencadenan procesos de escurrimiento superficial localizado que degradan completamente el suelo al formar cárcavas de diferente profundidad (**Figura 7.31**).

Una buena parte de la agricultura en la Sierra Centro y la Sierra Sur se desarrolla en lotes pequeños en áreas de pendiente inclinada que se preparan con azadón o con yunta. Aun cuando la preparación del suelo con yunta es menos erosiva que la labranza mecanizada, la remoción del suelo, la pendiente pronunciada y la lluvia concentrada provocan severa erosión (**Figura 7.32** y **7.33**). En la región no existen programas estatales o privados de conservación de suelos que puedan encarar el acelerado proceso erosivo a nivel de finca; sin embargo, varios proyectos de investigación han demostrado que varias medidas de conservación son efectivas para controlar la erosión en este tipo de suelos. La labranza en curvas de nivel, junto con fajas de pasto o árboles al contorno, ubicadas a intervalos cortos es una práctica básica que retarda y dispersa la escorrentía, deposita los sedimentos en la parte baja del lote y reduce la formación de cárcavas y lentamente va formando una terraza que finalmente termina en una estructura que reduce la escorrentía y evita la pérdida de suelo. En los callejones intermedios se siembran con diversos cultivos en un suelo que paulatinamente tiene mejores condiciones físicas, químicas y biológicas que facilitan el manejo (Dercon, *et al.*, 2003; Dercon, *et al.*, 2006; Dercon, *et al.*, 2007).

Por otro lado, los movimientos en masa son muy frecuentes en las partes altas y medias de la Sierra Centro como de la Sierra Sur causando en ocasiones eventos desastrosos como la pérdidas de caminos y otras obras de infraestructura, así como la destrucción de casas y pequeños pueblos (Ohl and Bussmann, 2004). Si bien las tierras de la región tienen predisposición para los movimientos en masa por el tipo de suelo y la inclinación de la pendiente, una buena proporción de estos eventos son iniciados por actividad antrópica, como la deforestación y el posterior uso del suelo para actividades agrícolas y ganaderas sin ninguna medida de conservación. La pérdida de la cobertura vegetal durante el proceso es también el origen de la gran cantidad de sedimentos que se acumulan lejos de la fuente y que causan problemas de difícil manejo (Molina, *et al.*, 2008).

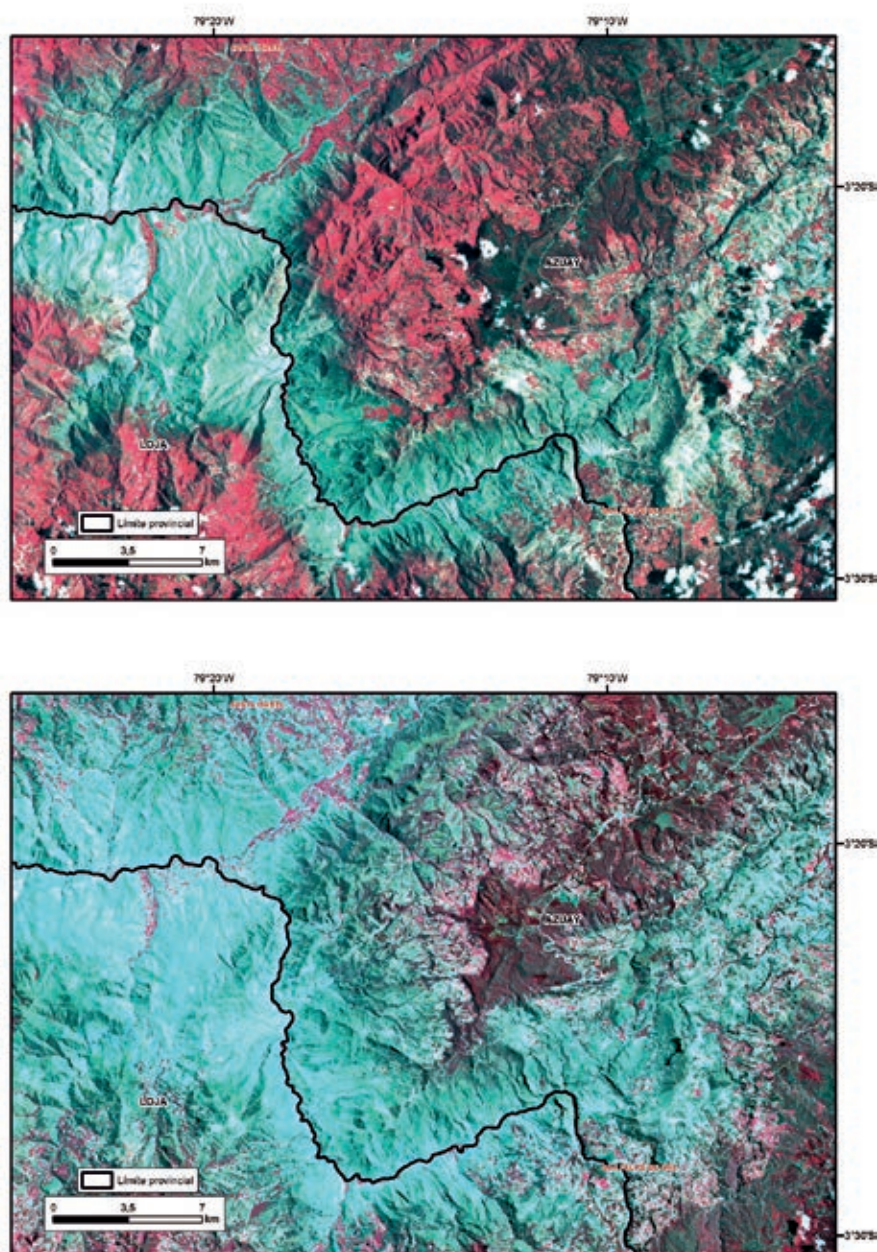


Figura 7.30. Avance de la erosión al sur de la provincia de Azuay y norte de la provincia de Loja determinada mediante imágenes satelitales de falso color infrarrojo. El color celeste claro representa las áreas erosionadas y el celeste oscuro áreas en proceso de erosión, mientras que el color rojo oscuro representa las áreas cubiertas por vegetación natural y el rojo claro los cultivos. Arriba: imagen del satélite Landsat 5, bandas 4, 3, 2 (RGB) del año 1986. Abajo: imagen del satélite Landsat 8, bandas 5, 4, 3 (RGB) del año 2020. Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.



Figura 7.31. Desencadenamiento de procesos erosivos debido a la tala y quema de bosque en una vertiente heterogénea, con pendiente media a fuerte (25 a 40 %), localizado en la parroquia Girón, cantón Girón, provincia de Azuay (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015e).



Figura 7.32. Erosión activa en lote de producción de maíz, el Pindal, Pindal, Loja.



Figura 7.33. Lote de producción de maíz en un área con alto potencial de erosión, Sumaypamba, Saraguro, Loja.

7.4. Erosión en la región Costa

La región Costa del Ecuador, con una superficie de 70.6 mil km², tiene una población de 8.5 millones de personas, la cuarta parte en la zona rural. La región contribuye con el 25 % de la población económicamente activa, con más de la mitad del producto interno bruto agropecuario nacional y es una fuente de bienes agro-exportables que generan ingresos de más de 4.5 mil millones de dólares anuales. La producción para consumo interno y exportación se origina en 219 809 unidades productivas que representan el 26.1 % de las unidades de producción agropecuaria (UPA's) del país (ESPAC, 2017; Fiallos, 2017; Pino, *et al.*, 2018). En este contexto, es imperativa la gestión sostenible de los recursos naturales, particularmente suelo y agua, para proteger el ambiente, alcanzar la seguridad y soberanía alimentaria, dinamizar la producción para el consumo interno y la exportación, factores que contribuyen al fortalecimiento de la economía regional y nacional.

La Agricultura sin adecuadas prácticas de manejo deteriora el suelo, condición que reduce el potencial agrícola, ralentiza el desarrollo y promueve la migración de la población joven del campo a los centros urbanos. Novillo, *et al.* (2018), al comparar el efecto de varios sistemas de producción de la Costa con el bosque natural, detectaron un claro declinamiento de la calidad de las propiedades físicas del suelo cuando la tierra se utiliza para agricultura. Controlar los factores que promueven el deterioro del suelo representa un gran desafío que carece de la atención debida en los ámbitos público y privado. Amplias zonas de la Costa son vulnerables a la pérdida de la capa superior del suelo por erosión hídrica, condición que deprime el rendimiento de los cultivos y desvaloriza la tierra. El proceso de erosión reduce la calidad del suelo debido a que desgasta la fertilidad, afecta la estructura y restringe la infiltración, situación que aumenta el escurrimiento superficial, disminuye las reservas de agua subterránea y anula por varios meses al año el flujo de los pequeños cauces que son fuentes de agua para la producción agropecuaria.

Un gran porcentaje de la producción de banano, cacao, palma aceitera, plátano, arroz, maíz, soya, piña, frutales, carne y leche, entre otros, proviene de las cuatro principales cuencas hidrográficas (62.5 mil km²) que drenan la mayoría de las 4.7 millones de hectáreas cultivadas en la Costa (FLACSO, *et al.*, 2008). La

red de drenaje (bajos, esteros, riachuelos y ríos) en cada una de las cuencas se articula a los ejes fluviales conformados por los ríos Babahoyo-Daule-Guayas, Esmeraldas-Blanco-Quinindé, Cayapas-Onzole y Carrizal-Chone. La cuenca del río Guayas, con 34 mil km², es la más grande de la región, cuenta con 16 zonas climáticas, 6 órdenes de suelos (CLIRSEN, *et al.*, 2009) y alberga una población cercana al 40 % del total nacional (SENAGUA-DED, 2009). Es necesario proteger el suelo de la erosión hídrica en las secciones media y alta de todas las cuencas para salvaguardar el suministro de servicios ambientales a los múltiples nichos ecológicos, mantener e incrementar la producción agropecuaria y, en general, generar el bienestar de la población.

7.4.1. Condiciones de la Costa relevantes para la erosión

Desde la perspectiva geológica, gran parte de la región Costa se compone de zonas de acumulación y sedimentación de materiales provenientes de la pendiente occidental de la cordillera de Los Andes. Sin embargo, los sedimentos también se originan en una franja montañosa conocida como cordillera Costera, muy antigua y discontinua, con altitudes que no rebasan los 800 m s. n. m., que de igual forma modifica el relieve de la región. Esta estructura se extiende desde el cerro Santa Ana en Guayaquil, continúa con los cerros de Chongón y Colonche, Cerro de Hojas, Paján y Panca en Manabí, avanzando hasta el sur de la provincia de Esmeraldas. Las cuencas del sistema fluvial Carrizal-Chone y del río Portoviejo drenan parte de la pendiente occidental de esta franja montañosa cuando cruzan por Manabí. El flujo del río Daule se alimenta de varios ríos menores que nacen en la pendiente oriental de la cordillera de la Costera (CEDEGE, 1970).

Estas particularidades geomorfológicas han formado las zonas de pie de monte, mesetas, colinas, valles y planicies aluviales que conforman el macro relieve de la región. El clima, el macro relieve y la topografía del terreno han promovido el desarrollo de suelos con diferentes capacidades de uso para la actividad agrícola, capacidades que también van acompañadas de diferentes amenazas de degradación que varían en función de la intensidad de uso del suelo. La erosión hídrica es el principal proceso de degradación de estos suelos y es la que suministra los sedimentos que llegan a los ríos y valles que cruzan las secciones medias y altas de las cuencas hidrográficas. La **Figura 7.34** muestra terrenos cultivados en ladera que bordean un pequeño valle formado por el río Moraspungo que fluye a la planicie costera desde un sector de pie de monte andino, en la zona del mismo nombre, provincia de Cotopaxi. En la **Figura 7.35** se visualiza el extenso valle fluvial construido por el río Calabí antes de cruzar la población de Ventanas, provincia de Los Ríos. La **Figura 7.36** presenta las planicies aluviales del gran valle del río Quevedo cerca de la ciudad del mismo nombre. En todos los casos, la erosión del suelo en los sitios altos de las laderas es la fuente de los sedimentos que se transportan por los ríos que cruzan estos valles. En el periodo lluvioso la coloración del agua cambia a un color café en respuesta a la gran cantidad de partículas de suelo en suspensión.



Figura 7.34. Valle formado por el río Moraspungo en el pie de monte de la zona del mismo nombre, provincia de Cotopaxi, con laderas cultivadas vulnerables a la erosión hídrica y terrenos con suelo aluvial en los costados del cauce.



Figura 7.35. Gran valle aluvial junto al pie de monte occidental de la cordillera Andina, con suelos formados por los sedimentos arrastrados y depositados por el río Calabí durante miles de años de recorrido y desbordamientos frecuentes. Zona de Quinsaloma, Provincia de Los Ríos.



Figura 7.36. El río Quevedo, que cruza el valle y ciudad del mismo nombre, muestra caudal completo y la típica coloración del agua que arrastra sedimentos originados por erosión hídrica en las partes altas de su recorrido.

Aunque existen diferencias importantes dentro de la región, en general, los suelos de la Costa son fértiles. A medida que las condiciones ambientales cambian con la gradiente altitudinal, desde un valle interandino hacia la planicie costera, la fertilidad del suelo aumenta reflejándose en valores más altos de CIC y pH (García y Schlatter, 2012). Sin embargo, el uso intenso del suelo, que generalmente sobrepasa la capacidad de uso, y la ausencia de prácticas conservacionistas en los suelos ubicados en ladera aumenta el riesgo de erosión hídrica en zonas lluviosas con relieve irregular (**Figura 7.37**). Las acciones preventivas para minimizar el proceso erosivo y para recuperar la productividad de las zonas erosionadas son los más grandes desafíos para la gestión del suelo en las cuencas hidrográficas de la Costa. La **Figura 7.38** muestra la escasa profundidad del suelo en un terreno con una pendiente pronunciada que todavía dispone de cobertura semi arbórea e ilustra bien el riesgo de erosión hídrica que amenaza a cientos de miles de hectáreas cultivadas en la región cuando desaparece la cobertura.



Figura 7.37. Huerta tradicional de cacao, con especies semi arbóreas intercaladas, que brinda una buena cobertura al suelo ubicada en una ladera empinada (derecha). Cuando se elimina parcialmente la cobertura para la siembra de maíz el suelo queda muy vulnerable a la erosión hídrica (izquierda). Zona de Quevedo, provincia de Los Ríos.



Figura 7.38. Cobertura vegetal semi arbórea en un terreno de ladera que protege contra la erosión hídrica a un fino horizonte de suelo superficial asentado sobre cenizas volcánicas antiguas de avanzada meteorización y baja fertilidad. Zona de Ventanas, provincia de Los Ríos.

La mayor superficie de la franja costera se encuentra entre 10 y 600 m s. n. m., en la categoría bioclimática de bosque húmedo tropical y subhúmedo tropical, con temperaturas y precipitaciones medias anuales en el rango de 23 - 25 °C y 1 000 - 3 000 mm, respectivamente.

La variación de la actividad biológica en los múltiples nichos ecológicos depende de la distribución geográfica y temporal de las lluvias, relieve del paisaje y calidad del suelo antes que de los cambios menores de temperatura (Cañadas, 1983). Según el análisis de los patrones de lluvia de la región Costa, el periodo seco se amplía de norte a sur y de este a oeste, mientras que la precipitación aumenta de sur a norte y de oeste a este. La distribución de la precipitación va mejorando del centro hacia el norte de la región, aunque sin perder estacionalidad. El periodo lluvioso empieza en diciembre y, dependiendo de la zona y cuenca hidrográfica, finaliza entre abril y julio (INAMHI, 2015). La estacionalidad y la intensidad de las lluvias en el primer trimestre de cada año, el relieve del terreno, la textura de la capa superficial del suelo y la cobertura vegetal determinan la vulnerabilidad del suelo a la erosión.

En algunas zonas de la Costa, los depósitos antiguos de ceniza de avanzada meteorización han sido rejuvenecidos por la deposición de cenizas provenientes de actividad volcánica reciente, a veces en una capa superficial > 1 m de profundidad (**Figura 7.39**). El rejuvenecimiento es menor a medida que las zonas se alejan de la cordillera andina, dejando al final solamente una capa superficial de 10 a 20 cm de nueva ceniza, como sucede en la zona de relieves ondulados de El Empalme-Balzar. En la zona maicera de Balzar, antes de irrumpir en la llanura aluvial del río Daule (principal zona arrocerera del Ecuador), el relieve del paisaje es ondulado con suelos de textura franco arcillosa con arcillas de tipo montmorillonítico que aportan a su fertilidad (**Figura 7.40**). Existen también paisajes con relieves ondulados y suelos arcillosos formados de cenizas antiguas de avanzada meteorización dominados por arcillas de tipo caolinítico/óxidos hidratados de hierro en la zona de Zapotal-Ventanas-Palenque. El factor común de todos estos paisajes es la presencia de cientos de miles de hectáreas de terrenos de ladera utilizados para el monocultivo del maíz, un sistema de producción con un alto riesgo de pérdida de suelo por erosión hídrica (**Figura 7.41**). Al recorrer las fincas maiceras se nota que no se han incorporado prácticas de conservación en el manejo del suelo.



Figura 7.39. Perfil de un suelo fértil, franco limoso y profundo (Hapludands) de la serie Pichilingue con una capa de cenizas volcánicas de reciente deposición y considerable espesor. Aun con mínima inclinación del terreno, estos suelos son altamente vulnerables a la erosión hídrica. Zona de Quevedo, provincia de Los Ríos.



Figura 7.40. Relieve típico de una finca recién sembrada manualmente con maíz en terrenos de ladera que presentan suelos con predominancia de arcillas de tipo montmorillonítico y alta vulnerabilidad a la erosión hídrica. Zona de Balzar, provincia del Guayas.



Figura 7.41. Cultivo de maíz en una meseta disectada por una vía natural de drenaje con terrenos con claras señales de desgaste del suelo debido a erosión laminar y por surcos. Zona de Ventanas, Provincia de Los Ríos.

En la franja de transición entre la sección media y las planicies aluviales de la Cuenca del Guayas es frecuente la presencia de zonas con suelos aluviales en bajos o “pozas” donde se acumulan importantes volúmenes de agua y sedimentos provenientes de la erosión de los suelos en los terrenos de colinas y mesetas colindantes cultivados con maíz en el periodo lluvioso. La profundidad del nivel de agua en las pozas imposibilita el trabajo agrícola en este periodo, sin embargo, a medida que el nivel disminuye y el agua retrocede al avanzar el periodo seco se puede sembrar gradualmente arroz de trasplante (**Figura 7.42**). El piso de las pozas se rejuvenece constantemente con la sedimentación del suelo perdido por erosión de los terrenos de ladera que las bordean.



Figura 7.42. Sistemas de producción de arroz de pozas con suelos que se benefician de los sedimentos que la erosión hídrica transporta desde los terrenos de ladera circundantes dedicados a la producción de maíz en la época lluviosa ubicados en la franja de transición a la sección baja de la Cuenca del Guayas. Zona de Puebloviejo, provincia Los Ríos.

Las zonas bajas, bordeadas por terrenos altos y lomas colindantes, se conectan conformando micro cuencas y pequeños cauces que atraviesan las fincas tejiendo redes de drenaje que finalmente se articulan con los grandes sistemas fluviales que drenan las cuencas hidrográficas de la Costa. El proceso de erosión empieza con el uso agrícola de los terrenos de ladera. La **Figura 7.43** ilustra esta situación en una finca maicera en la zona de Palenque, Los Ríos. Se observa un terreno bajo sembrado con arroz que en el periodo lluvioso se convierte parcialmente en el lecho de un cauce pequeño, angosto y superficial que transporta sedimentos desbordándose de cuando en cuando, pero sin fuerza para dañar al cultivo. En realidad, es un micro valle que se rejuvenece permanentemente al recibir sedimentos de las laderas adyacentes sembradas con maíz, aunque esto no es garantía de que los desequilibrios nutricionales estén ausentes como se observa en este caso en el cultivo de arroz (Vergara, 2019). El flujo de agua desaparece al finalizar las lluvias, pero el terreno conserva suficiente humedad para producir un ciclo de maíz, frejol o maní en el periodo seco.



Figura 7.43. La disposición del cultivo de maíz en terreno de ladera vulnerable a la erosión hídrica y de arroz en el terreno bajo que actúa como drenaje natural, es un escenario útil para explicar a estudiantes de Agronomía la dinámica del desgaste del suelo y la posterior acumulación de sedimentos. Zona de Palenque, Provincia de Los Ríos.

El micro relieve dentro de las fincas causa grandes diferencias en la calidad del suelo y en el flujo de agua en las partes bajas. El típico paisaje de una micro cuenca sembrada con maíz en la zona de Mocache, Los Ríos, se visualiza en la **Figura 7.44**. El sedimento acumulado y visible en los terrenos más bajos es la evidencia de un activo proceso erosivo que desgasta el suelo de los terrenos de ladera colindantes. Con seguridad, en pocos años la rentabilidad de la producción de maíz en esta finca sufrirá un descenso significativo, incluso con un desempeño económico negativo (Chila, 2021). La **Figura 7.45** muestra un terreno de ladera dedicado al monocultivo de maíz en la zona de Ventanas, Los Ríos, exhibiendo un agudo desgaste del suelo por erosión hídrica que deja expuesto el subsuelo, circunstancia que hizo que el nivel de materia orgánica declinara hasta 0.8 %.



Figura 7.44. Paisaje de una micro cuenca típica en una finca maicera de la Zona de Mocache, Provincia de Los Ríos, que exhibe un activo proceso de erosión hídrica que con el tiempo irá acortando la rentabilidad del cultivo, incluso hasta alcanzar cifras negativas.



Figura 7.45. Terreno de ladera en una micro cuenca dedicado al monocultivo de maíz con síntomas de un severo desgaste por erosión hídrica que hizo descender el contenido de materia orgánica hasta 0.8 %. Zona de Ventanas, provincia de Los Ríos.

Cultivos como el cacao pierden significativamente su capacidad para acumular rendimiento cuando se siembran en suelos de ladera afectados por la erosión, llegando incluso a producir la mitad con respecto al rendimiento de los mismos cultivos sembrados a poca distancia en zonas con relieve plano (Amores, *et al.*, 2014). En la **Figura 7.46** se observa el efecto negativo de la erosión en las plantas de café sembradas en un lote ubicado en una ladera erosionada y más arcillosa (antes con maíz) en la zona de Quevedo que muestran pobre crecimiento y defoliación en comparación con las plantas en la franja con más humedad bordeando el pie de la ladera. La clorosis se debe a la pobre nutrición del cultivo establecido en el suelo de menor fertilidad, condición acentuada por la insuficiencia hídrica en el periodo seco.



Figura 7.46. Plantas de café en terreno de ladera que muestran aguda clorosis comparadas con aquellas que exhiben una mejor condición nutricional al pie de la colina en respuesta a la acumulación de sedimentos producidos por la erosión. Zona de Quevedo, provincia de Los Ríos.

Situaciones como las descritas son frecuentes en todas las cuencas hidrográficas de la Costa, incluyendo aquellas de bosque seco tropical como la del río Chongón en la península de Santa Elena. Aunque escasa pero concentrada, la precipitación recibida (500 a 600 mm de lluvia anuales) justifica el uso de medidas de conservación del suelo (**Figura 7.47**), pero estas no son habituales. En general, en todas las zonas afectadas, la erosión no capta la atención de los agricultores al inicio del proceso y es alarma solamente cuando aparecen descensos importantes de la producción.



Figura 7.47. Plantación de café robusta con hileras trazadas siguiendo las curvas a nivel para minimizar la erosión hídrica en una zona de bosque subhúmedo tropical cerca de Cerecita, provincia de Santa Elena.

Las planicies aluviales en las zonas más bajas se rejuvenecen continuamente al captar los sedimentos arrastrados por los ríos desde las secciones medias y altas de las cuencas hidrográficas. Se considera que en la cuenca del río Guayas, la más productiva del Ecuador, más del 80 % de la superficie cultivada presenta alto riesgo de erosión hídrica con pérdidas potenciales de suelo entre 10 y 200 toneladas $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, dependiendo de la localización en la cuenca. Por ejemplo, se ha estimado que las pérdidas potenciales de suelo de la subcuenca del río Sibimbe en el pie de monte de la zona de Las Naves, provincia de Bolívar, es de 348 toneladas $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, mientras que en la subcuenca del río Babahoyo, en la llanura aluvial de la Cuenca del Guayas, desciende a 31 toneladas $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (IDEA, 1988). Por otro lado, la zonificación del riesgo de erosión hídrica en la provincia de Manabí demostró que el 19.4 % de la superficie (~ 365 000 hectáreas) tiene alto riesgo de degradación del suelo por erosión hídrica y que la actividad humana de los últimos 50 años ha reducido significativamente los recursos forestales nativos, eliminando la cobertura vegetal con el consecuente incremento de la escorrentía y erosión (Zambrano, *et al.*, 2020), un fenómeno extrapolable a otras zonas de la Costa (**Figura 7.48**). Por otro lado, también se ha estimado que las pérdidas potenciales de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Portoviejo, provincia de Manabí, podrían variar de 0-5 $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en el 75 % del área, de 5-10 $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en el 22 % y que en el 3 % restante existe el potencial de pérdidas mayores a 10 $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (Jaramillo, 2015). Finalmente, un estudio sobre los efectos del cambio de uso del suelo en la Costa asignó a las provincias del Oro y Esmeraldas las tasas más altas de pérdida de la vegetación natural y, además, reportó pérdidas de suelo $> 100 \text{ t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en ciertos sitios de la provincia de Manabí (Pineda, 2019).



Figura 7.48. Colinas de pie de monte transformadas en potreros luego de la eliminación de la cobertura arbórea natural a pocos kilómetros del inicio de la llanura de la región Costa. Zona de La Maná, provincia de Cotopaxi.

El riesgo de erosión en las zonas bajas (planicies aluviales) de las cuencas hidrográficas no es importante, aunque en el periodo lluvioso el riesgo de inundación y drenaje insuficiente restringe el uso de algunas áreas para la agricultura, inclusive para el cultivo de arroz en terrenos demasiado bajos. Por el contrario, los terrenos con suelos aluviales de banco (terrazas aluviales a mayor altitud sobre el nivel del río) que son francos, profundos y mejor drenados, están entre los mejores suelos para la agricultura por su alta fertilidad (**Figura 7.49**), aunque con frecuencia presentan insuficiencia de fósforo (Jiménez, 2020). Una proporción importante de la superficie sembrada con banano se asienta en este tipo de suelos (Buste, 2019).



Figura 7.49. Suelos aluviales en terrazas de banco impulsan el desarrollo vigoroso del maíz (y plátano al fondo) en comparación con el menor crecimiento de las plantas en la terraza aluvial aledaña más baja, debido a restricciones de drenaje y nivel freático del río Quevedo que fluye a pocos metros.

El flujo de los grandes ríos de la Costa transporta y deposita una gran carga de sedimentos a lo largo de su curso y desembocadura en el océano Pacífico. La formación de islotes en continuo crecimiento en el río Guayas, frente de la ciudad de Guayaquil, es consecuencia de la sedimentación de partículas de suelo desprendidas por el proceso erosivo que va de la mano con la creciente actividad agrícola en la sección media y alta de la Cuenca del Guayas sin inclusión de prácticas de conservación del suelo. Cabe señalar que hasta la década de 1950 la erosión hídrica no era un factor importante de degradación del suelo en la Costa porque la agricultura con métodos intensivos de producción no era frecuente.

Las leyes de reforma agraria en las décadas de 1960 y 1970 y la política de “sembrar el petróleo” promulgadas en la década de 1970, incentivaron la colonización, deforestación y fragmentación de los predios agrícolas de la Costa. Una práctica común era la siembra de cultivos perennes para asegurar la tenencia de la tierra, pero desde la década de 1970 en adelante tomaron impulso los cultivos mecanizados de ciclo corto (maíz y soya), principalmente en la zona central de la Cuenca del río Guayas. La adopción generalizada de la mecanización estuvo divorciada de las prácticas de conservación del suelo y fue el inicio de un largo periodo de degradación de este recurso que sigue hasta la actualidad. Luego del fenómeno del Niño en 1981, no fueron pocos los agricultores que sembraron arroz con maquinaria en suelos de tierras altas con áreas de ladera, una apuesta riesgosa que se discontinuó en pocos años, pero que mientras se mantuvo dio lugar a impactantes escenas de erosión hídrica. En la zona de Quevedo se produjo un proceso de erosión muy activo por la excesiva pulverización del suelo para facilitar el trabajo de las máquinas sembradoras, práctica que, inmediatamente después de la siembra, iba seguida por el apisonamiento del suelo para asegurar la uniformidad de la germinación de la semilla.

Ya sea que se trate de agricultura manual o mecanizada en predios agrícolas de cualquier tamaño, los lotes planos o con poca inclinación son los que primero entran en producción por la facilidad para trabajarlos. Con el paso del tiempo se van incorporando lotes localizados en pendientes cada vez con mayor inclinación (**Figura 7.50**), incluso reemplazando cultivos conservacionistas como las huertas tradicionales de cacao para generar, mediante la producción de maíz, un mayor flujo de efectivo en el corto plazo. Esta secuencia de uso de la tierra, que incorpora a la producción suelos en terrenos cada vez más inclinados sin medidas conservacionistas, es una práctica que se mantiene hasta la actualidad impulsando un activo proceso de erosión hídrica en la región.



Figura 7.50. La eliminación de la vegetación semi arbórea y arbustiva intercalada con huertas tradicionales de cacao en terrenos inclinados libera espacio para sembrar maíz, dejando el suelo sin cobertura y altamente vulnerable a la erosión como se observa en este lote localizado en la zona de Mocache, provincia de Los Ríos.

La fuerza del agua en los cauces de los ríos y las inundaciones por desbordamiento son los factores que remodelan continuamente el paisaje de las fincas. El riesgo del recorte de los barrancos y erosión de las orillas de los ríos por acción del rápido y voluminoso flujo del agua durante el periodo lluvioso está siempre presente y puede reducir la superficie de los terrenos de cultivo aledaños (**Figura 7.51**). Por ejemplo, el barranco en el curso del río Quevedo, un sector de la Estación Experimental Pichilingue del INIAP, ha retrocedido alrededor de 40 m en 30 años debido al socavamiento causado por el flujo del agua; no es difícil imaginar lo que puede ocurrir en las próximas décadas. En el mismo sector, unos pocos cientos de metros aguas abajo, la corriente había recortado los bordes de pequeñas fincas asentadas en suelos aluviales formados por el mismo río. Los propietarios de los predios afectados se disputaban la tenencia de un islote en el centro del río que utilizaban para la siembra comercial de sandía en el periodo seco, cuando bajaba el nivel del agua; cada uno argumentaba que el islote se había formado con “tierra” de sus predios. Estas vivencias reflejan otra dimensión de la erosión hídrica, esta vez constituida por el socavamiento de las orillas de los ríos como fuente de sedimentos que terminan rellenando los cauces y acumulándose en las partes más planas y bajas de las cuencas hidrográficas.



Figura 7.51. El caudaloso flujo del río Chipe durante el periodo lluvioso socava los terrenos desprotegidos de las fincas que colindan con el cauce, alimentando su carga de sedimentos. Zona de Valencia, provincia de Los Ríos.

7.4.2. Producción de maíz y erosión

El sistema productivo más vulnerable a la erosión hídrica en la región Costa es el monocultivo de maíz. La superficie cultivada con maíz en la región es de alrededor de 250 000 hectáreas, la mayoría en manos de pequeños productores con extensiones que varían entre 1 y 5 hectáreas. Con una producción anual estimada de 1.5 millones de toneladas de grano, el maíz es el pilar de una cadena agro alimentaria para consumo directo del grano y producción de proteína animal (huevos, carne de pollo y carne de cerdo) valorada en miles de millones de dólares y que en buena medida está amenazada por la erosión del suelo. Gran parte de esta producción, si no es toda, se origina en zonas con topografía irregular, estimándose que al menos dos tercios de la superficie dedicada a este cultivo se siembra en suelos de terrenos inclinados. Estudios conducidos en fincas de las zonas de Mocache, Ventanas y Balzar revelan que el 60, 86 y 50 % de la superficie dedicada al maíz está en manos de pequeños productores ubicados en terrenos de ladera con

pendientes de 2.5 a > 30 %, 2.5 a 30 % y 15 a 40 %, respectivamente (Aguayo, 2016; Chila, 2021; Rosado, 2021). Por otro lado, la evaluación del rendimiento de grano en 20 fincas de la zona de Ventanas, provincia de Los Ríos, reveló que el 14 % de la superficie sembrada con maíz corresponde a terrenos planos con un rendimiento promedio de 9 t ha⁻¹, mientras que el 86 % se ubica en terrenos con pendientes que van de 2.5 a > 30 % con un rendimiento promedio de 7.8 t ha⁻¹. La media de rendimiento retrocedió 11.2 % en terrenos inclinados mientras que en terrenos con pendiente del ≥ 30 % el retroceso fue del 28 %. Como era de esperarse, estos resultados causaron cambios importantes del retorno por cada dólar invertido pasando de US \$ 0.86 en terrenos planos a US \$ 0.16 en terrenos inclinados (Rosado, 2021). La **Figura 7.52** visualiza el paisaje típico de un campo maicero con terrenos susceptibles a la erosión.



Figura 7.52. Terrenos en mesetas colinadas susceptibles a erosión hídrica sembrados manualmente con maíz. Zona de Balzar, provincia de Los Guayas.

Las siembras de maíz se realizan manualmente con cero labranza, excepto en superficies medianas y grandes con acceso a la mecanización. El sistema de cero labranza mitiga, hasta cierto punto, la erosión en terrenos con pendientes ligeras (Amores, 1992). La preparación para la siembra usualmente incluye el apilamiento de los residuos de la cosecha anterior y los residuos del corte de la vegetación espontánea para la posterior quema entre septiembre y noviembre con el objetivo de dejar el suelo sin cobertura para facilitar la siembra y demás labores agrícolas. La temperatura de la quema inactiva las semillas de las malezas en la capa superficial del suelo, eliminando la competencia por agua y nutrientes y reduciendo la incidencia de insectos-plaga. Además, las cenizas de la quema dejan en el suelo un importante aporte de nutrientes que promueve un crecimiento vigoroso del maíz (**Figura 7.53**) con plantas más rendidoras, cuando la siembra coincide con las franjas o sitios donde se depositaron las cenizas acumuladas. El beneficio de la ceniza para la nutrición del maíz es claro, sin embargo, los productores no parecen estar conscientes de que la quema de los restos vegetales restringe el secuestro de carbono orgánico, al igual que el reciclamiento de nutrientes provenientes de la descomposición de dichos residuos, dos importantes servicios ambientales del suelo. Por otro lado, la eliminación de la cobertura deja desprotegida la superficie y como la siembra coincide con el inicio de las lluvias, la escorrentía en terrenos de ladera arrastra con facilidad tanto el suelo como las cenizas. Las señales del desgaste se reflejan en la reducción de la calidad del suelo, en la disminución de biomasa producida y finalmente en la rentabilidad del cultivo. Los **Cuadros 7.7** y **7.8** resumen esta situación en fincas localizadas en Mocache, provincia de Los Ríos, y Balzar, provincia del Guayas.



Figura 7.53. Plantas de maíz sembradas en un terreno con poca inclinación, pero vulnerable a la erosión hídrica, coinciden en un sitio de acumulación de cenizas de la quema de residuos vegetales y exhiben más vigor que aquellas en un lugar sin cenizas, aun después de la primera fertilización con nitrógeno. Zona del Empalme, provincia del Guayas.

Cuadro 7.7. Biomasa (panca y mazorca), rendimiento de grano y rentabilidad del maíz en lotes comerciales fertilizados con NPK en suelo plano y de ladera en el 2016*. Mocache, Los Ríos (Aguayo, 2016).

Terreno	Biomasa	Rendimiento	Retorno US \$ ⁻¹ invertido
	----- t ha ⁻¹ -----		
Plano	9.9	2.9	0.45
Ladera (pendiente 28 %)	9.0	2.2	0.31

* En el 2016 la incidencia de la enfermedad Mancha de Asfalto redujo en 2/3 el rendimiento potencial de maíz en esta zona.

Cuadro 7.8. Eficiencia de uso del N, peso de 100 semillas, rendimiento de grano y rentabilidad del maíz en lotes comerciales fertilizados con NPK en suelos de terreno plano y de ladera en el 2020. Balzar, Guayas (Chila, 2021).

Terreno	Eficiencia de uso de N*	Peso de 100 semillas	Rendimiento	Retorno US \$ ⁻¹ Invertido
		g	t ha ⁻¹	US \$
Plano	0.76	31	10.4	0.93
Ladera (pendiente 39 %)	0.55	28	8.4	0.62

* Relación entre N absorbido por el cultivo y la dosis de N aplicado como fertilizante ha⁻¹.

La pobre gestión del suelo, recurso básico de la agricultura, en la principal zona productora de maíz en el centro de la Cuenca del río Guayas (Quevedo, Mocache, Buena Fe, Palenque, Ventanas, El Empalme y Balzar) ha sido reportada por varios autores (Aguayo, 2016; Tigreros, 2017; Chila y Amores, 2019; Guadamud y Amores, 2019; Chila, 2021; Rosado, 2021). La escasa cobertura del suelo y la ausencia de medidas conservacionistas, incluso la más básica que es la siembra en contorno, están acelerando el

proceso erosivo y desgastando a paso acelerado la capacidad productiva del suelo en las fincas maiceras dentro de las microcuencas. El desgaste es promovido por una cultura de desconocimiento, nula inversión en prácticas de conservación, fraccionamiento de la tierra y escasa percepción del valor de los recursos suelo y agua para el desarrollo agropecuario. El deterioro del suelo puede avanzar a un ritmo acelerado incluso en terrenos con suelos profundos, buena capacidad de uso y poca inclinación. La **Figura 7.54** muestra la fuerza destructora de la erosión hídrica de un suelo franco, fértil y profundo en un terreno con poca inclinación en la zona de Quevedo, Los Ríos (en la **Figura 7.39** se presenta el perfil de un suelo de las mismas características).



Figura 7.54. Un suelo de buena fertilidad, franco-limoso y profundo, afectado por erosión hídrica debido a una ligera inclinación del terreno, condición que sin control puede conducir a la formación de una cárcava en este campo de maíz. Zona de Quevedo, provincia de Los Ríos.

Como se ha dicho, no existen obras de conservación de suelos en los terrenos de ladera de la zona maicera de la Costa, en el mejor de los casos y en pocas fincas, se observa que las hileras del cultivo son trazadas de manera transversal a la dirección de la pendiente, aunque nunca siguiendo curvas de contorno a nivel (**Figura 7.55**). En este contexto, viene al caso comentar que un canal de desviación apoyado por una terraza construidos como parte de una iniciativa para controlar la escorrentía y erosión en un lote maicero de la zona de Quevedo tuvo corta vida. La infraestructura estuvo en pie durante un par de años ya que el terreno se aplanó con tractor para facilitar la preparación del suelo para la siembra mecanizada, en una clara muestra del desconocimiento y ausencia de cultura conservacionista. Con frecuencia, la insuficiente rentabilidad del cultivo de maíz en suelos de ladera ha conducido a su sustitución por cultivos perennes como frutales, cacao, piña y otros, a pesar de que el suelo ya se ha deteriorado, condición que termina traduciéndose en menores tasas de crecimiento de las plantas de los nuevos cultivos (**Figura 7.56**).



Figura 7.55. Aunque sembradas a través de la pendiente, la orientación de las hileras en este campo de maíz difícilmente disminuye la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica, como lo sugieren las señales de desgaste en la superficie del suelo y pobre nutrición del cultivo. Zona de Ventanas, Provincia de Los Ríos.



Figura 7.56. Terrenos de ladera sembrados recientemente con cacao en suelos desgastados por la erosión hídrica y que antes estaban dedicados al monocultivo de maíz. Zona de Mocache, provincia de Los Ríos.

7.4.3. Comentarios finales sobre la erosión en la Costa

La inclusión de buenas prácticas de manejo del suelo en los sistemas de cultivo de la Costa es un componente clave para el objetivo de lograr la seguridad y soberanía alimentaria del país y generar producción exportable para contribuir a la economía del Ecuador. Sin embargo, la erosión hídrica degrada la capacidad productiva de los suelos vulnerables en gran parte de la superficie cultivada de la región. La erosión en los terrenos de las secciones media y alta de las cuencas son la fuente de los materiales sedimentados en las llanuras bajas. El monocultivo del maíz en terrenos de ladera es el sistema de producción más vulnerable a la pérdida de suelo por erosión hídrica, aunque sistemas de producción con otros cultivos también son afectados, posiblemente en menor cuantía. A pesar del evidente proceso erosivo, no se utilizan prácticas de conservación del suelo en la producción de maíz, incluyendo la más básica que es el trazo de las hileras del cultivo de manera perpendicular a la dirección de la pendiente. Cabe resaltar que la atención prestada a este problema a nivel de productor y de políticas públicas es mínima. El enfoque de cuenca hidrográfica resulta útil para definir la vulnerabilidad, mejorar la comprensión del impacto erosivo y planificar formas de enfrentar el problema.

7.5. Erosión en la región Amazónica

La Amazonía ecuatoriana está ubicada en el extremo oeste de la gran llanura amazónica que limita con la cordillera de los Andes (**Figura 7.57**). La región fue definida por las transformaciones de las estructuras geológicas y los cambios climáticos sufridos a través del tiempo. Ambos procesos lograron consolidar una amplia zona de abundantes precipitaciones y relieves variados que promovieron el desarrollo de suelos diversos que soportan poblaciones de flora y fauna de gran diversidad y riqueza (Winckell, *et al.*, 1997).

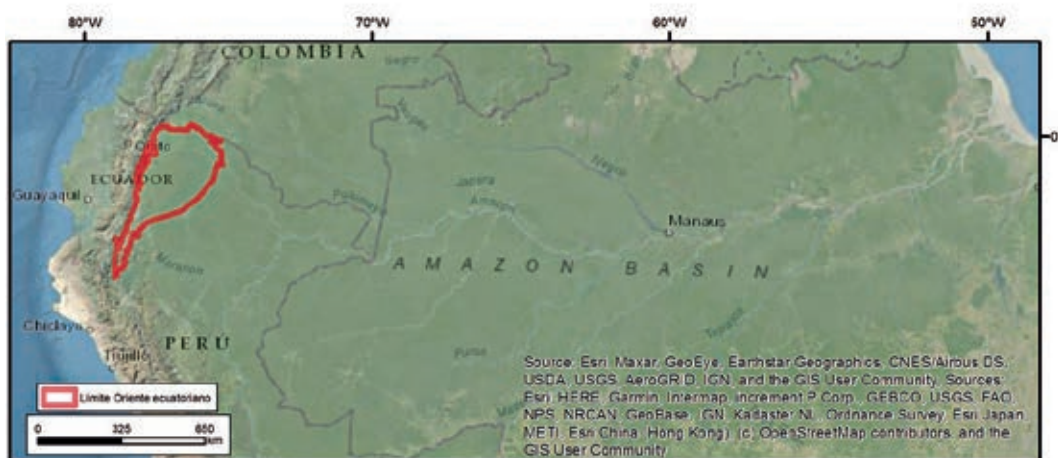


Figura 7.57. Ubicación del Oriente ecuatoriano con respecto a la Cuenca Amazónica.

Antes de la década de 1980 existían muy pocos rastros de erosión en la Amazonía ecuatoriana y los sitios con evidente degradación se ubicaban en las viejas zonas de colonización como Zamora, Puyo, Tena y Baeza (Custode y Viennot, 1986), pero la colonización promovida por el estado incrementó el asentamiento de campesinos sin tierra que siguieron a la apertura de las vías de penetración para extracción y transporte de crudo, madera y metales, ampliando significativamente la frontera agrícola con actividades de agricultura, ganadería y la combinación de agricultura y ganadería. Estas nuevas formas de uso del suelo fueron precedidas por procesos de intensa deforestación que eliminaron la cobertura y dejaron la superficie del suelo expuesta a procesos erosivos provocados por el agua y el viento (Mena, 2010; CEPAL y Patrimonio Natural, 2013; Sánchez, 2015). Según el censo del año 2000, en la región existían 108 707 unidades productivas agropecuarias (UPA) en una superficie de 988 229 hectáreas, de las cuales el 4 % correspondía a UPAs con una superficie > 100 hectáreas, el 11 % UPAs entre 50 y 100 hectáreas, el 54 % a

UPAs entre 10 y 50 hectáreas y el 31 % UPAs < 10 hectáreas (Nieto y Caicedo, 2012; López, *et al.*, 2019). La susceptibilidad a la erosión de los suelos de la Amazonía depende también de su localización en la región. Relieves subandinos, que comprenden los corredores, cordilleras y contrafuertes de la cordillera montañosos o submontañosos, ubicados escalonadamente entre 2 500 y 600 m s. n. m., tienen relieves muy inclinados y son muy susceptibles a la erosión cuando desaparece la cobertura (**Figura 7.58**). Sin embargo, los suelos de la Amazonía Periandina, que se encuentran debajo de los 600 m s. n. m. (el área más extensa de la región Amazónica ecuatoriana), no deben tener uso agropecuario porque son muy susceptibles a la erosión cuando pierden la cobertura y se usa para cultivar pastos y cultivos de ciclo corto (Custode y Sourdat, 1986; Custode y Viennot, 1986).

Los suelos de la Amazonía Periandina son muy frágiles y se degradan fácilmente, en muchos casos de forma irreversible, cuando la cobertura de bosque es reemplazada por pastos. Si bien el suelo recibe una nueva cobertura permanente, el pisoteo de los animales promovido por la descontrolada actividad ganadera incrementa la densidad aparente y reduce la porosidad hasta que el suelo se compacta lo que limita el crecimiento de las raíces y reduce el crecimiento de los pastos (Bravo, *et al.*, 2016; Calero y Vizuite, 2018). Este deterioro se hizo evidente al evaluar la capacidad de carga animal a mediados de la década de 1990 encontrándose que ésta se reducía de 1.4 a 0.5 unidades bovinas ha⁻¹ en un periodo de 5 a 10 años (Burgos, 1997).

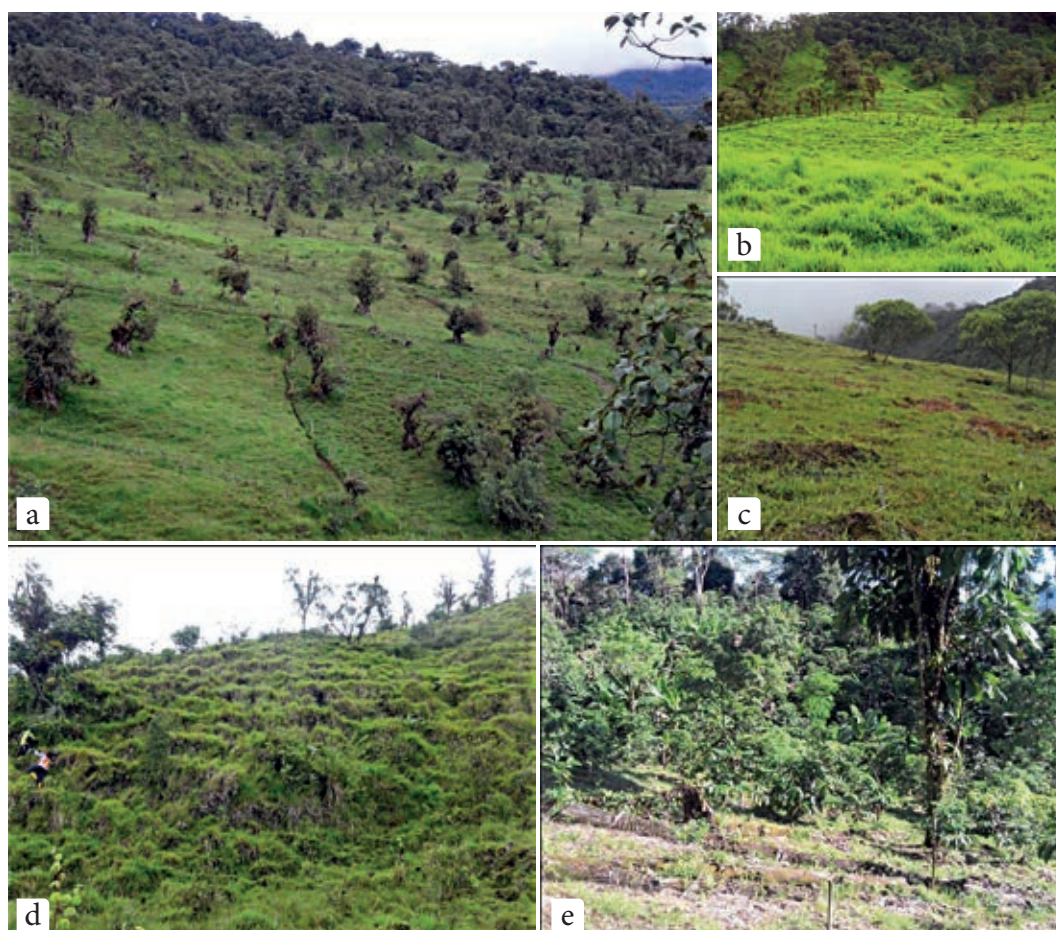


Figura 7.58. Erosión en los Relieves Subandinos (Cordillera de Napo), con suelos provenientes de ceniza volcánica: **a)** deforestación; **b)** establecimiento de pasturas (saboya); **c)** degradación de potreros con pasturas de bajo valor nutritivo (gramas); **d)** erosión por pisoteo del ganado; **e)** erosión hídrica en establecimiento de cultivos permanentes posterior a la tumba del bosque natural (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015d, 2016b, 2016c, 2016a).

La fertilidad de los suelos ácidos sujetos a altas precipitaciones de la Amazonía Periandina que soporta la exuberante selva amazónica se basa en el perfecto reciclamiento de los nutrientes que provienen de los residuos de las hojas de los árboles que se acumulan en la superficie y de la biomasa de las raíces muertas. La descomposición de estos residuos es una constante fuente de nutrientes para la vegetación que, además, acumula materia orgánica en el horizonte superficial del perfil que tiene alrededor de 10-12 cm de profundidad. El carbono orgánico de esta capa superficial se oxida fácilmente cuando estos suelos se utilizan con agricultura intensiva, particularmente si se mueve el suelo para labores de siembra, afectando radicalmente la dinámica de los microorganismos y el reciclamiento de nutrientes y perturbando la estructura del suelo por cambio en densidad aparente y porosidad. El suelo se degrada rápidamente porque perdió el equilibrio provisto por la dinámica natural del bosque, los cultivos producen cada vez menos y, finalmente, el suelo se degrada completamente por la erosión provocada por la escorrentía sobre el suelo sellado y compactado (**Figura 7.59**).



Figura 7.59. Izquierda, deforestación en preparación para la siembra de maíz en suelos rojos ácidos (Oxic Dystrudepts) en Loreto, Orellana; derecha, el mismo tipo de suelo degradado por erosión al perder la cobertura.

Una vez que el hecho de la eliminación del bosque se ha consolidado, el uso productivo de estos suelos debe encaminarse hacia el manejo con agroforestería en sus diversas manifestaciones. Los sistemas agroforestales generan también abundantes residuos que mantienen la fertilidad del suelo mediante el reciclamiento de nutrientes y la estabilización de la temperatura del suelo lo que reduce la volatilización de nitrógeno. Además, las condiciones provistas por la cobertura superficial mantienen la estructura del suelo y controlan la erosión (Paredes, *et al.*, 2018).

7.5.1. Principales procesos erosivos de la Amazonía ecuatoriana

El único esfuerzo para definir las diferentes formas en las que se presentan los procesos erosivos en la Amazonia ecuatoriana y cuantificar las áreas afectadas en ese momento fue conducido por Almeida, *et al.* (1984) y se resumió en el mapa de la **Figura 7.60**, pero las fotografías que acompañan la descripción del mapa fueron obtenidas por el proyecto “Levantamiento de Cartografía Temática, escala 1: 25 000”, coordinado por MAGAP-SIGTIERRAS (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015a).

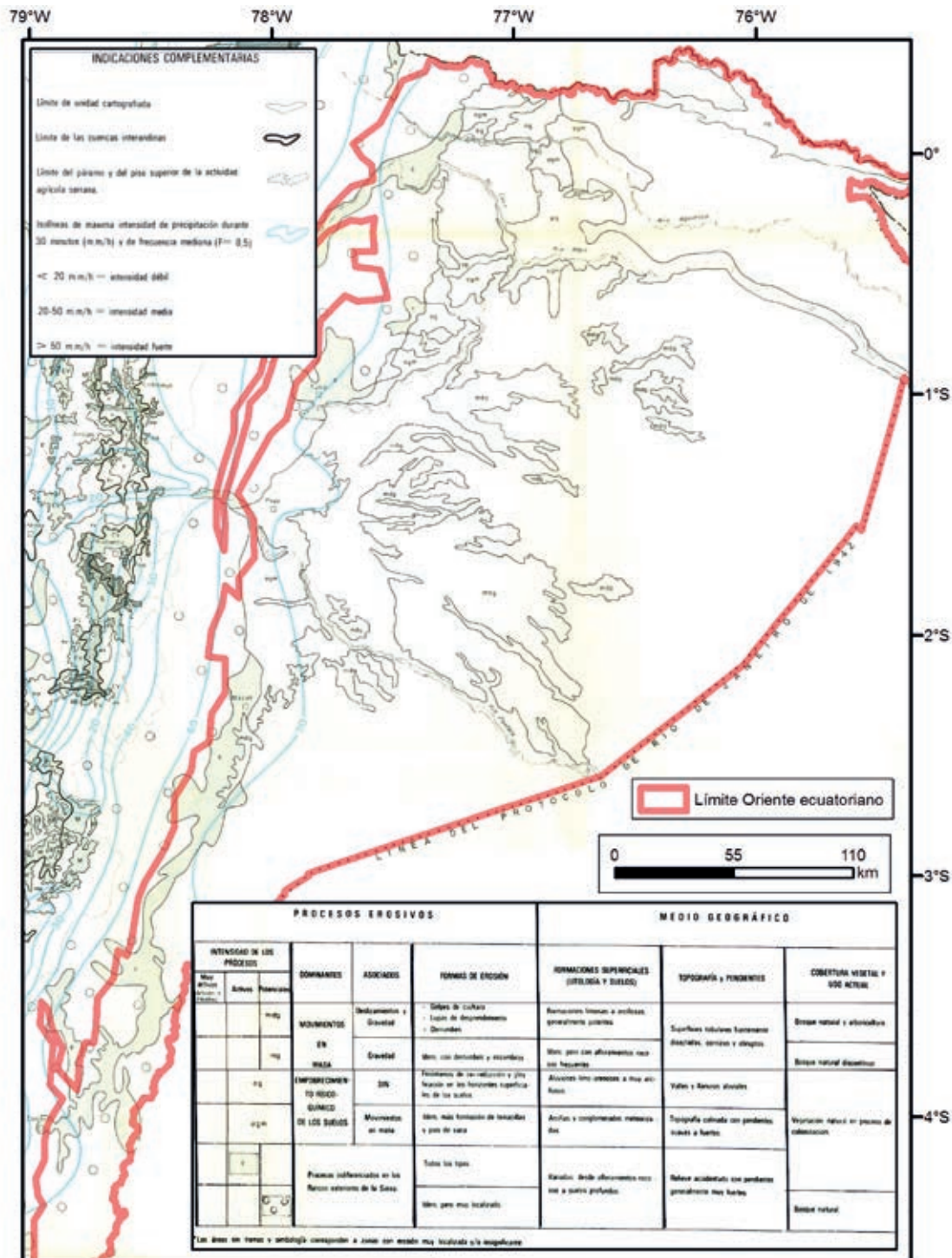


Figura 7.60. Procesos erosivos de la Amazonía ecuatoriana (Adaptado de Almeida *et al.*, 1984).

7.5.1.1. Asociación movimientos en masa, deslizamientos y gravedad potenciales

Este tipo de procesos erosivos se presenta en las áreas identificadas con las letras **mgd** en la **Figura 7.60** y corresponden a zonas de humedad constante donde se presentan los fenómenos típicos de movimientos en masa superficiales y profundos (golpes de cuchara, roturas de desgarramiento, lupas de soliflucción) (**Figura 7.61**). Debido a las pendientes más fuertes, estos procesos se asocian con los movimientos de gravedad (derrumbes, deslizamientos en planchas, etc.) que se inician en el sitio de contacto entre la roca

madre y la capa superior de suelo alterado. El peligro es potencial cuando existe una buena protección del suelo proporcionada por una cobertura vegetal forestal y las únicas áreas afectadas son aquellas con pastizales y cultivos. Este tipo de proceso erosivo se localiza, principalmente, en las mesetas del piedemonte central, donde la zona más vulnerable es el gran relieve tabular de la provincia de Pastaza, que se abre en abanico hacia el este desde el Puyo y está localizado entre los 250 y 300 m s. n. m. La cornisa que bordea estas mesetas y los lugares de su superficie más disectados y menos protegidos por la vegetación son más sensibles a los movimientos en masa por deslizamientos y gravedad. La superficie total de la Amazonía que es de 95 672 km² y Almeida, *et al.* (1984) determinaron que, en ese tiempo, las áreas afectadas por este proceso erosivo eran de aproximadamente el 10 % de esa superficie total.



Figura 7.61. Proceso de erosión de movimiento en masa ubicado en las mesetas del piedemonte central (Amazonía Periandina) (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2016c).

7.5.1.2. Empobrecimiento físico-químico y en asociación con movimientos en masa

Las zonas con empobrecimiento físico-químico del suelo se identifican con las letras **og** en la **Figura 7.60** y las que están en asociación con movimientos en masa se describen con las letras **omg**. Las zonas con empobrecimiento físico-químico se localizan a lo largo del eje Puyo-Baeza-Lago Agrio-Coca y se caracterizan por un empobrecimiento de los suelos arcillosos debido a los fenómenos de oxi-reducción en los primeros centímetros del perfil. El pisoteo del ganado, que deja huellas del tamaño de sus cascos, compacta el suelo y limita la circulación del agua generando condiciones anaeróbicas en el perfil que son perjudiciales para el crecimiento de las plantas (**Figura 7.62**). Este tipo de proceso de degradación domina en las superficies planas de las llanuras y terrazas del piedemonte alejado y en los paisajes fluviales.



Figura 7.62. Izquierda, perfil de suelo ubicado en la Amazonía Periandina que muestra áreas de color plomo como indicador del empobrecimiento físico-químico debido a la reducción del Fe por saturación con agua. Derecha, llanura aluvial característica del sitio (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015c).

En las colinas, cuyas pendientes pueden llegar al 40 %, el empobrecimiento físico-químico se asocia a los movimientos en masa (**ogm**) en forma de terracillas que pueden generar deslizamientos (**Figura 7.63**). Este tipo de erosión se localiza en las colinas bajas orientales, en las colinas occidentales, en las gradas medias y disectadas en el piedemonte alejado y en los piedemontes próximos con cobertura de ceniza volcánica. Almeida, *et al.* (1984) determinaron que las áreas afectadas con estos procesos erosivos en ese tiempo eran de aproximadamente el 11 % de la superficie total (**og** 5 % y **ogm** 6 %).



Figura 7.63. Sitio localizado en las colinas bajas orientales donde los movimiento en masa en forma de terracillas pueden, localmente, generar deslizamientos de masas de suelos (MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA, 2015b).

7.5.1.3. *Procesos indiferenciados activos*

Estos procesos erosivos, representados por la letra **c** en la **Figura 7.60**, ocurren en los corredores y depresiones de los relieves subandinos donde se realiza actividad agrícola. Se trata de áreas de producción localizadas en ambos lados de los ejes de comunicación cultivadas con pastizales, cultivos de subsistencia y bosques con arboricultura bajo sombra. En las pendientes más fuertes se producen movimientos en masa, escurrimiento difuso-concentrado y movimientos de gravedad. Representaban el 7 % del área total de la Amazonía ecuatoriana.

7.5.1.4. *Procesos indiferenciados potenciales*

Estos procesos se representan con el símbolo **O** en la **Figura 7.60** y corresponden a potenciales procesos erosivos que podrían presentarse al norte en los flancos de la cordillera del Napo (zona con cobertura de cenizas volcánicas) y al sur en Santiago. En estas zonas se debe mantener el medio natural forestal y no se debería conducir actividad agrícola. Los relieves son muy fuertes que generalmente tienen pendientes abruptas de 70 a 100 %. Es un medio natural frágil en equilibrio, pero el desmonte y las fuertes precipitaciones provocarían procesos erosivos catastróficos como el deslizamiento de tierra sobre las vertientes inestables. En 1984 representaban el 9 % del área total del Oriente ecuatoriano.

7.6. Consecuencias de la erosión

La principal consecuencia de la erosión en los campos es la pérdida de suelo productivo. La erosión arrastra las capas superficiales del perfil del suelo que son las que tienen mayor contenido de materia orgánica y nutrientes. Las nuevas capas de suelo expuestas a la superficie tienen baja fertilidad, malas condiciones físicas y poca actividad microbiana. En consecuencia, los cultivos sembrados en suelos erosionados tienen poco vigor y baja productividad. A medida que avanza la erosión y se pierde más suelo, la situación se hace más precaria hasta que finalmente aflora el subsuelo, dejando una matriz completamente improductiva. Estas condiciones, comunes en extensas áreas de la Sierra y Costa ecuatorianas, solo traen pobreza y finalmente promueven el abandono del campo y la migración a las ciudades (Vanacker *et al.* 2003).

En el pasado, el problema de erosión se minimizaba porque los suelos eran profundos y las zanjas y cárcavas provocadas por la erosión eran cubiertas con un pase de tractor o bueyes dejando la sensación de que nada había ocurrido. Esto simplemente continuaba reduciendo la profundidad de las capas superficiales de suelo fértil hasta que aparecía el subsuelo. Este ha sido un proceso de muchos años que ha degradado completamente los suelos en extensas áreas del país, particularmente en la Sierra. Los suelos erosionados producen cultivos menos vigorosos que no cubren completamente el suelo y dejan menor cantidad de residuos en el campo que, junto con el movimiento constante del suelo con el arado, promueven la paulatina pérdida de materia orgánica y nutrientes esenciales del campo. Esta situación la sienten los agricultores y es común el comentario de que la parcela antes producía más y mejores cosechas.

La pérdida del suelo por erosión causa problemas irreparables en los sitios donde ocurre, pero, además, las partículas de suelo que abandonan las áreas agrícolas son transportadas en forma de sedimentos a lugares aledaños donde se acumulan en las zonas bajas, afectando en su paso obras de infraestructura, caminos y reservorios. Periódicamente se reportan problemas de esta naturaleza durante la época lluviosa en diversos sitios de la Sierra, Costa y Oriente de Ecuador. La habilitación de la infraestructura afectada es una situación molesta y de alto costo que deben enfrentar los gobiernos seccionales.

Los sedimentos también se acumulan en sitios lejanos de la fuente en ríos, reservorios grandes y represas. Las represas de generación de electricidad pierden capacidad operacional por la acumulación de sedimentos. Estos sedimentos salieron de lotes de agricultores que no manejaron el suelo con cuidado, en muchos casos, muy lejos de la zona de acumulación. Fue notorio el problema de la represa del Paute que estuvo a punto de llenarse con sedimentos y dejar de producir electricidad (Harden, 1993; Donoso, 2009). Lo mismo podría ocurrir con las nuevas represas en operación.

Los nutrientes y materia orgánica arrastrados por los sedimentos producen efectos secundarios en las zonas de acumulación. Los sedimentos cargados de nutrientes que se depositan en los cuerpos de agua (ríos, lagos y represas) promueven el abundante crecimiento de algas y otras plantas acuáticas. Los nutrientes, que en las parcelas aguas arriba permitían el crecimiento vigoroso de cultivos, ahora promueven el crecimiento activo de estas plantas acuáticas. Esta acumulación de material vegetal en los cuerpos de agua dificulta la navegación y causa la muerte de peces por el proceso de eutroficación. Además, los grandes volúmenes de material vegetal acumulado obstruyen las obras de infraestructura como represas y proyectos de riego. La limpieza del material acumulado es muy costosa y difícil.

7.7. Control de la erosión

La discusión previa ha demostrado claramente que la erosión es la principal amenaza para las funciones del suelo en todas las regiones de Ecuador y que es imperativo el control de los procesos erosivos a nivel nacional. Se considera que un tasa tolerable de pérdida por erosión es aquella que mantiene los servicios ambientales del suelo sin degradarlo (Pennock, 2019). Por esta razón, las medidas de conservación de suelos para mantener las funciones ambientales del suelo y lograr la producción sostenible de alimentos deben enfocarse en prevenir y reducir la degradación de la tierra mediante el complemento de tecnologías agronómicas, vegetativas y estructurales dentro de sistemas de gobernanza conducentes al trabajo cooperativo (WOCAT, 2020).

Desde el punto de vista operativo a nivel de finca o cuenca hidrográfica existen diversas prácticas de conservación para controlar la erosión y preservar el suelo. El control de la escorrentía superficial se logra mediante prácticas mecánicas y el mantenimiento de la cobertura del suelo se logra con prácticas agronómicas. Estos métodos para controlar la erosión no son desconocidos ni complicados de adoptar, sin embargo, muchos productores los ven como una molestia porque obligan a manejar los lotes en forma diferente a la tradicional, que aparentemente es más rápida y simple. Entre las principales medidas mecánicas de control de erosión se encuentran los caminos de agua, bordes de campo, zanjas de desviación y terrazas de formación lenta, mientras que entre las principales prácticas agronómicas están la siembra en curvas de nivel, la labranza de conservación o siembra directa y la rotación de cultivos (Tayupanta y Córdova, 1990; Raudes and Sagastume, 2009; Pennock, 2019).

Las actividades de conservación de suelos más exitosas de Ecuador se desarrollaron con el respaldo de CARE-Internacional que apoyó técnica y financieramente el proyecto denominado “Manejo del Uso Sostenible de Tierras Andinas (PROMUSTA)” en varias localidades de la Sierra. Una de estas localidades, y quizá la más notable, estuvo asentada en la parroquia Pilahuín, cantón Ambato, provincia de Tungurahua. Las primeras inquietudes para controlar la erosión en la cuenca alta del río Pastaza, provincia de Tungurahua, fueron generadas por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) a inicios de la década de 1990 con el objetivo de preservar la represa hidroeléctrica Agoyán. Los primeros contactos con comunidades de la Parroquia Pilahuín fueron realizados por técnicos del Proyecto PROMUSTA (CARE-MAG), quienes concretaron las acciones para la ejecución del proyecto denominado “Uso Sostenible del Suelo en los Páramos de la Cuenca Alta del Río Pastaza” que finalmente fue conducido en el campo por la Fundación Pastaza, un consorcio interinstitucional en el que participaban algunas instituciones interesadas en la conservación de los recursos naturales de la Cuenca Alta del Río Pastaza como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Consejo Provincial de Tungurahua, INECEL, la Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas (CESA) y la Fundación para la Conservación de los Páramos del Ecuador.

Dos organizaciones de productores de la parroquia de Pilahuín se comprometieron a trabajar en el proyecto: la Comunidad de Chiquicahua de 123 familias y la comunidad de Tamboloma a 250 familias. El proyecto inició sus labores de campo en 1997 con el objetivo de fomentar la autogestión del campesino minifundista a través de la adopción y adaptación de prácticas del uso sostenible de la tierra que contribuyan a controlar la degradación del suelo y a mejorar el nivel de vida de los productores en el corto y largo plazo. La estrategia utilizada para la implementación del proyecto se basaba en la formación de grupos de

técnicos extensionistas y promotores campesinos. Los grupos de extensionistas, compuestos por un técnico agrícola, un pecuario, un forestal y un social, trabajaron con los agricultores según el piso altitudinal en el cual se encontraban ubicados. Por otro lado, dentro de cada comunidad se identificaron y capacitaron a promotores campesinos, quienes eran agricultores de la zona que utilizaron sus propias tierras para implementar las tecnologías propuestas. Estas parcelas demostrativas fueron enseñando a la comunidad los beneficios del nuevo manejo de las parcelas y poco a poco fue creciendo el área con manejo diferente hasta levantar un imponente proyecto conservacionista nunca visto en Ecuador y que transformó las pendientes pronunciadas de Pilahuín en un jardín (**Figura 7.64**).

El proyecto puso énfasis en la difusión de dos tipos de tecnologías (Winters, *et al.*, 1998). El primer grupo de tecnologías buscaba la conservación de recursos naturales a través de: a) control de la erosión hídrica mediante zanjas de desviación, hileras en contorno, curvas de nivel, terrazas de formación lenta, terrazas de banco y b) mejoramiento del manejo del agua a través de la construcción de reservorios y canales de riego. El segundo grupo de tecnologías proponía la intensificación y diversificación de la producción agrícola con las siguientes actividades: a) construcción de barreras vivas, agroforestería (viveros, plantación de árboles), b) mejoramiento de la fertilidad de suelo (lombricultura, fertilización mineral y orgánica), c) diversificación agrícola (huertos familiares, siembra de hortalizas, siembra de frutales, producción de frutales y hortalizas en invernaderos), d) mejoramiento agrícola (nuevas rotaciones, nuevas asociaciones, mejoramiento del manejo de cultivos y e) mejoramiento de manejo de los animales menores (manejo de especies menores: cuyes, conejos, piscicultura).

Según Winters, *et al.* (1998), las razones para el éxito del proyecto PROMUSTA en las diferentes áreas del país en las que se implementó, y particularmente ciertas en el proyecto de Pilahuín fueron: a) oferta de una variedad de innovaciones tecnológicas, lo que permite que el agricultor escoja según sus necesidades particulares y b) utilización de prácticas de conservación de suelos que, junto con cambios en las prácticas de manejo de los cultivos, se ajustaron a las necesidades de producción de los agricultores. Los autores concluyen indicando que el manejo conservacionista de recursos es sostenible cuando se lo plantea como un sistema integrado de recursos. Aun cuando el proyecto entregó incentivos para la adopción de las prácticas conservacionistas (semillas, plantas y algunos insumos para la producción) no se hicieron pagos directos para incentivar la participación en el proyecto. Indudablemente, para que un proyecto de esta naturaleza funcione es necesario que exista un sistema de extensión agrícola que tenga técnicos comprometidos y bien entrenados y que, además, tenga la información del potencial agrícola de la zona de intervención, así como el potencial y limitaciones de los grupos familiares de agricultores incluidos en el proyecto.

En la evaluación del proyecto PROMUSTA, Winters, *et al.* (1998) indicaron también que existe el potencial de que el proyecto reduzca sus actividades o se detenga una vez que las instituciones que promovieron las actividades salgan de las comunidades, situación que ha ocurrido con varios proyectos de diferente naturaleza en el pasado. Efectivamente, el proyecto de conservación de Pilahuín dejó de recibir el apoyo de la Fundación Pastaza en el año 2002 y la actividad conservacionista fue paulatinamente olvidada y se ha llegado hasta extremos donde los agricultores han destruido las obras de conservación como terrazas y otras prácticas físicas de conservación por su percepción de que las mismas reducen la superficie cultivable. La erosión en el área donde estuvo ubicado el proyecto es ahora evidente (**Figura 7.64**).



Figura 7.64. Manejo conservacionista para control de erosión en lotes de pequeños productores en Pilahuín, cantón Ambato, provincia de Tungurahua. Izquierda: proyecto “Uso Sostenible del Suelo en los Páramos de la Cuenca Alta del Río Pastaza” en su apogeo en el año 1999 donde se observan las prácticas de conservación de suelo en el campo cruzando con las mismas prácticas varios lotes de los productores participantes. Derecha: misma área del proyecto de conservación en el año 2016, donde los productores han eliminado gran parte de las prácticas de control de erosión y ahora se observa afloramiento de cangahua.

7.7.1. Siembra directa

Una de las prácticas agronómicas que más contribuye al control de la erosión y al mejoramiento de la calidad del suelo es la labranza de conservación, cero labranza o siembra directa (SD). La labranza convencional (LC) comúnmente practicada por grandes y pequeños productores en Ecuador remueve el suelo para eliminar las malezas y preparar los surcos de siembra. Esta forma de manejo causa cambios profundos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que finalmente afectan el rendimiento de los cultivos y en la calidad del ambiente. El exceso de movimiento del suelo afecta el crecimiento del cultivo debido a que se reduce la disponibilidad y el transporte del agua, aire y nutrientes. Adicionalmente, el constante movimiento del suelo incrementa el riesgo de erosión y oxida la materia orgánica lo que promueve la pérdida de carbono orgánico (CO) del suelo, condiciones que reducen la resiliencia del suelo al estrés (Álvarez y Barraco, 2005; Wingeyer, *et al.*, 2015; Lal, 2017). Son varios los argumentos para mantener la práctica de remoción del suelo, se arguye que la remoción del suelo es necesaria para controlar las malezas, permitir una mejor aireación del suelo, evitar la compactación y desarrollar un medio adecuado para el desarrollo de las raíces, sin embargo, la realidad demuestra que, en la mayoría de los casos, la labranza solamente promueve efectos contrarios a los buscados con la utilización de esta práctica agrícola (**Figura 7.65**).

Los evidentes problemas de degradación causados por la LC han posibilitado el desarrollo de propuestas de manejo alternativo del suelo como la SD, técnica diseñada para evitar la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica y para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Crovetto, 2006; Baker and Saxton, 2008; Derpsch, *et al.*, 2010). El Centro de Información sobre Tecnología de Conservación (CTIC, por sus siglas en inglés) define a la SD como el sistema de preparación del suelo para la siembra en el que la remoción del suelo para la colocación de las semillas es mínima y las malezas se controlan utilizando herbicidas, de esta forma, el suelo no se mueve en ciclos consecutivos de siembra y cosecha (Towery and Werblow, 2010). El concepto de manejo del suelo por SD se apoya en cuatro pilares que son: a) eliminación del uso de arado y rastra; b) cobertura permanente del suelo; c) rotación de cultivos y; d) manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas (Derpsch, 1998; Fawcett and Towery, 2003; Dumanski, *et al.*, 2006; Gattinger, *et al.*, 2011). Se considera que los agricultores que manejan adecuadamente el sistema obtienen rendimientos satisfactorios a menor costo y de paso logran el invaluable beneficio de mejorar las propiedades del suelo.

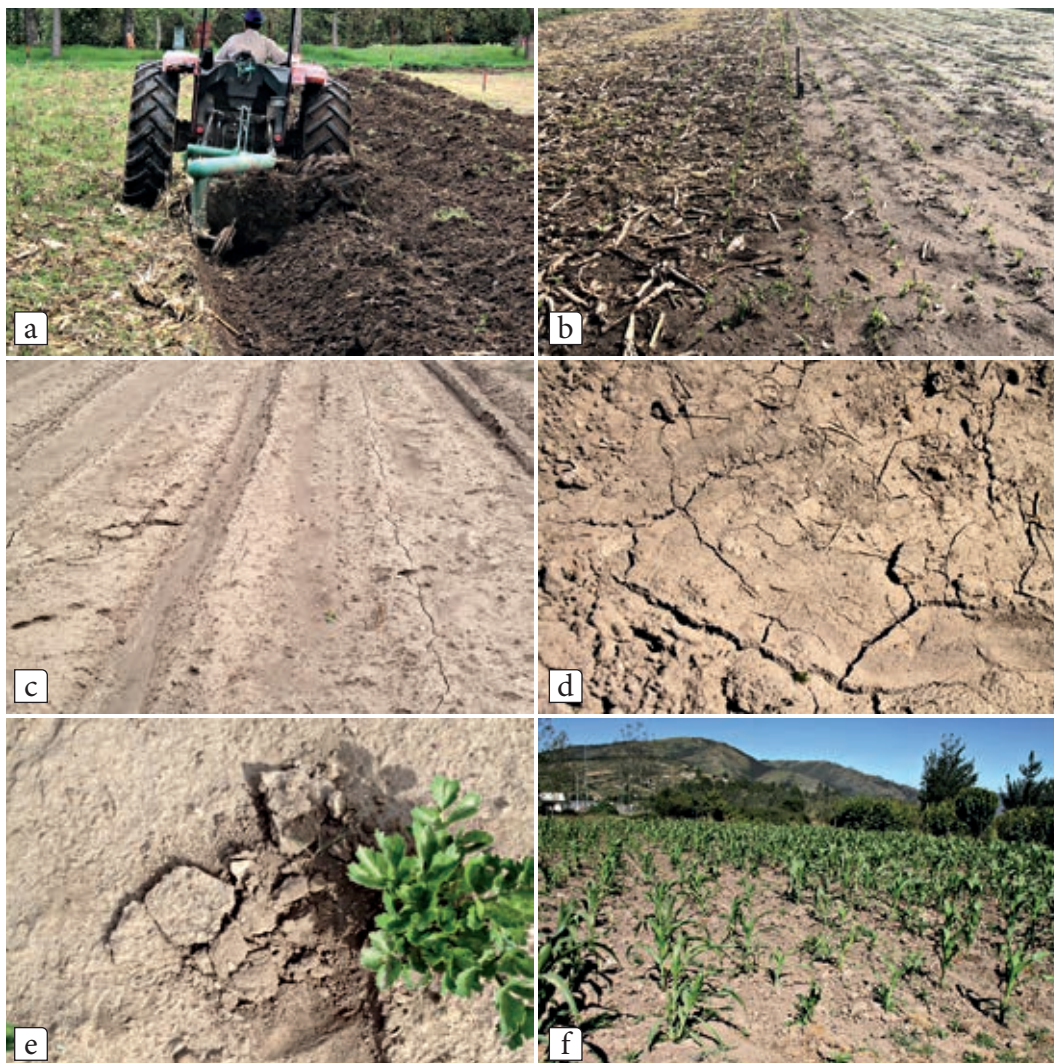


Figura 7.65. Efectos de la remoción del suelo por labranza en lotes de investigación del Centro Académico y Experimental La Tola (CADET-FCAg-UCE), Tumbaco, Quito, Pichincha: **a)** lote de suelo volcánico no utilizado por varios años en el que se inicia la labranza; **b)** escorrentía superficial y erosión en el mismo lote (derecha) comparado con el lote con cobertura por siembra directa en el lote adyacente (izquierda); **c)** lote cercano al anterior que ha sido sometido a labranza convencional por varios años donde son evidentes los efectos adversos de la remoción constante de suelo; **d)** vista cercana del sellamiento superficial del suelo que inhibe la infiltración; **e)** formación de costras superficiales que deben quebrarse para sembrar nuevamente; **g)** pobre crecimiento del cultivo como resultado de la acumulación de efectos negativos de la labranza en las propiedades del suelo.

7.7.1.1. Desarrollo de la siembra directa

Los primeros proyectos de investigación desarrollados para evaluar la posibilidad de prescindir de la labranza tuvieron lugar en Inglaterra en la década de 1940. Para el año 1955, el descubrimiento del herbicida Gramoxone (Paraquat) alentó a la compañía británica Imperial Chemical Industry (ICI) a continuar con la investigación sobre la tecnología de siembra directa (SD) en el Reino Unido. También se desarrollaron estudios iniciales en Suiza y Escandinavia (Islam and Reeder, 2014; Kertész and Madarász, 2014). Sin embargo, la técnica de SD realmente se desarrolló y tomó impulso en Estados Unidos durante la década de 1960 en los estados de Kentucky y Ohio, dentro del marco de lo que empezó a conocerse como agricultura de conservación. La idea de que las semillas podrían plantarse directamente en los residuos de la cosecha anterior generó una corriente de conservación de suelos en los Estados Unidos que culminó en el desarrollo de prácticas de SD que se aplican hoy en día a nivel mundial (Islam and Reeder, 2014). Para el

año 2019 la superficie bajo siembra directa en los Estados Unidos y Canadá fue de 71.5 y 12.5 millones de hectáreas, respectivamente, principalmente con cultivos como maíz, soya, alfalfa, algodón y canola.

Las primeras experiencias en Argentina se registran en la segunda mitad de la década de 1970. Sin embargo, la adopción del sistema tardó 15 años hasta que el precio de los herbicidas se redujo lo suficiente para lograr un control de malezas más efectivo, situación que permitió que la SD sea económicamente viable. El proceso se intensificó durante la década de 1980 y actualmente la SD en cultivos extensivos ha remplazado al modelo de LC (Perrachón, 2004; Alapin, 2008; INTA, 2011). Esta tecnología ha ido evolucionando hacia un enfoque en sistemas de producción que concilia la productividad con el ambiente, proponiendo una producción económicamente rentable, ambientalmente sustentable y socialmente aceptada por las empresas agropecuarias (Dantur, 2011; INTA, 2011; Friedrich, *et al.*, 2017). En el año 2019 el área cubierta con SD en Argentina fue de 24 millones de hectáreas, principalmente con maíz, soya, algodón y alfalfa.

La agricultura en el sur de Brasil se intensificó a fines de década de 1960 con la inclusión del cultivo de la soya en los sistemas de producción. Esta situación creó serios problemas de erosión y la recomendación de las instituciones públicas de investigación y extensión fue sustituir la agricultura por ganadería. Para evitar las serias pérdidas económicas que este cambio hubiese causado, algunos productores empezaron a experimentar con la labranza reducida y otras prácticas culturales. A mediados de la década de 1970 se desarrolló un paquete de SD adaptado a las condiciones locales y una cantidad limitada de productores lo probaron, pero la mayoría lo abandonó porque el control de malezas era difícil y las sembradoras ineficientes. La introducción del glifosato y la investigación realizada por varias instituciones (públicas, privadas, organizaciones de productores y fabricantes de maquinaria) produjeron un paquete eficiente a fines de esta década. La caída del precio del glifosato en la década del 1980 aumentó la rentabilidad de esta tecnología con respecto a la labranza convencional y favoreció su difusión (Landers, 2004). Cuatro décadas después de su introducción en territorio brasileño, el sistema de SD se ha consolidado como una tecnología conservacionista de gran aceptación por parte de los agricultores que se ha adaptado a diferentes regiones y a diferentes niveles tecnológicos desde el grande hasta el pequeño agricultor que usa la tracción animal (Wingeyer, *et al.*, 2015; Friedrich, *et al.*, 2017). Brasil utilizó 52.8 millones de hectáreas para producir soya, maíz, algodón y caña de azúcar en SD en el año 2019.

Esta forma de producción se ha expandido a otros países como Paraguay, Bolivia y Uruguay en América del Sur, donde también se practica en grandes extensiones de tierra (Derpsch, *et al.*, 2010; Wingeyer, *et al.*, 2015). La adopción de SD en países como Chile, Venezuela, Colombia y México ha sido más bien modesta en comparación con Argentina y Brasil (Derpsch, *et al.*, 2010).

Por otro lado, los esfuerzos para adaptar la SD en la agricultura de pequeños productores en las tierras altas de los Andes de América Central y América del Sur han sido menos exitosos y han encontrado problemas sociales y económicos que no han facilitado su adopción (Lal, 2006; Zamudio y León, 2008). Una de las principales razones por la que los pequeños productores utilizan LC es la de controlar malezas. Cuando se elimina la remoción del suelo utilizando SD el control de malezas (principalmente las malezas de hoja ancha) se vuelve muy importante. En los primeros años el control de malezas puede volverse difícil y costoso, pero con el transcurso del tiempo y con buen manejo la población de malezas se reduce gradualmente debido a que la ausencia de labranza no incorpora nuevas semillas o expone a la superficie semillas dormantes y la acumulación de residuos sobre la superficie controla la germinación y crecimiento de las malezas. El control inicial de malezas debe hacerse con herbicidas, particularmente glifosato, para lograr completo control de cobertura. Éste es quizá el factor que más limita la adopción de la SD por pequeños productores, junto con la utilización de animales o herramientas manuales para la siembra y fertilización de los cultivos (Wall, 1995; Ekboir, 2002; Derpsch, 2008).

Los primeros trabajos de investigación con SD en Ecuador se condujeron en el litoral ecuatoriano desde 1985 hasta 1990 en la Estación Experimental Pichilingue de INIAP. Las experiencias recopiladas sobre este sistema de siembra demostraron que puede ayudar a mantener la capacidad productiva del suelo y por

ende a solucionar o evitar los problemas causados por erosión hídrica en la época lluviosa, optimizando a la vez el uso de la humedad residual del suelo para los cultivos en la época seca (INIAP, 1990). Sin embargo, estos estudios no reportan los efectos de la adopción de SD en las propiedades del suelo. Estudios recientes conducidos por Acosta and Galárraga (2011) con maíz sembrado en dos ciclos consecutivos con SD en la zona de Santo Domingo de los Tsáchilas encontraron un ligero incremento en el contenido de MO, pero ningún cambio en las propiedades químicas del suelo. No se midieron los cambios que el sistema pudo haber producido en las propiedades físicas del suelo.

Se han desarrollado esfuerzos por evaluar los efectos de la SD en áreas de suelos localizadas en zonas de producción de pequeños productores en la Sierra Norte de Ecuador. Experimentos conducidos por INIAP en las provincias de Bolívar y Pichincha demostraron que es posible lograr rendimientos aceptables de maíz de polinización abierta (5.2 y 7.4 t ha⁻¹, respectivamente) cultivado bajo SD en lotes representativos de las condiciones de la producción en pequeños lotes de la Sierra (Alvarado, *et al.*, 2011). Por otro lado, Arévalo (2013) también condujo investigación con maíz duro en condiciones de agricultura de ladera en la cuenca del río Alumbre, en la provincia de Bolívar, encontrando que los rendimientos de LC y SD fueron similares y que no se evidenciaron cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo, probablemente debido al poco tiempo (dos ciclos) que el experimento estuvo en el campo. Por otro lado, los experimentos iniciados en el año 2015 por el grupo de suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Central del Ecuador (FCAg-UCE) reportaron ya cambios en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo luego de varios años de investigación continua (Toapanta, 2016; Ávila, 2019; Vasco, 2019; Serrano, 2020; Montesdeoca, 2021).

7.7.1.2. Cambios en el suelo inducidos por la siembra directa

El contenido de materia orgánica (MOS), que es el indicador más importante de la calidad del suelo, se define como la fracción orgánica que incluye los residuos vegetales y animales en descomposición, la biomasa microbiana y el humus, exceptuando los residuos vegetales y animales sin descomponer (Craswell and Lefroy, 2001; Ghisolfi, 2011). El contenido de MOS es importante porque está relacionado directa o indirectamente con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y cambia según el número de años de agricultura, tipo de cultivos, manejo de la labranza, rotaciones, manejo del cultivo, fertilización y los períodos de barbecho (Lal, 2011; Abdollahi and Munkholm, 2014).

La SD, la rotación de cultivos y el mantenimiento de adecuados niveles de fertilidad en el suelo permiten acumular y estabilizar los contenidos de MOS en el proceso denominado secuestro de carbono (INTA, 2011; Lal, 2011; Pittelkow, *et al.*, 2015). La descomposición de los residuos de los cultivos por acción microbiana produce una serie de reacciones de síntesis que llevan a la formación de compuestos estables de carbono en el suelo conocidos genéricamente con el nombre de humus. La mayoría de los compuestos orgánicos estables en el suelo corresponden a las sustancias húmicas (SH) las cuales son responsables del desarrollo del color, incremento de la agregación de las partículas, aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y de la liberación de nitrógeno (N), fósforo (P) y otros nutrientes durante el proceso de mineralización. El humus está formado por SH complejas [ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y huminas (HM)], compuestos que permanecen en el suelo como producto final de la descomposición de los residuos (Chen and Aviad, 1990; Baldock and Broos, 2012; Havlin, *et al.*, 2014).

Por otro lado, se argumenta que la acumulación de SH estables en el suelo por medio de prácticas agrícolas no es relevante y que los cambios del carbono orgánico del suelo (COS) son más relevantes cuando ocurren al inicio de la descomposición de los residuos orgánicos, periodo en el cual se liberan nutrientes y energía necesarios para el crecimiento de las plantas y para los procesos de estabilización del suelo (Lehmann and Kleber, 2015). Los mismos autores indican que muy pocos estudios han demostrado la relación entre la MOS y la productividad de los cultivos, sin embargo, muchos estudios han demostrado que la fracción química y biológicamente activa de la MOS tiene más relación con la productividad. Esta fracción, denominada materia orgánica particulada (MOP), está compuesta de las partículas de MOS de

tamaño en el rango 0.053 a 2 mm y que se pueden aislar y analizar fácilmente en el laboratorio. Se considera que la MOP es fuente de nutrientes para las plantas y alimento y energía para los microorganismos, pero es también la fracción MOS que incrementa la capacidad tampón y la CIC, atrapa los contaminantes como pesticidas y metales pesados e influencia la dinámica de las enfermedades en el suelo. En consecuencia, la acumulación de MOS al dejar de mover el suelo y al acumular residuos en la superficie es quizá el producto más importante de la adopción de SD.

La SD reduce radicalmente o elimina la remoción del suelo y acumula los residuos de los cultivos en la superficie lo que lleva a la estratificación de las propiedades del suelo. La estratificación es un proceso común y consiste en la distribución vertical del contenido de MOS, nutrientes y otras características en el perfil del suelo, generándose una acumulación en la capa superior de 0 a 5 cm y los contenidos se reducen gradualmente en la capas inferiores de 5 a 10 y de 10 a 20 cm, a diferencia de lo que ocurre con la distribución de nutrientes en LC que se estratifica muy poco o nada debido a que la labranza distribuye uniformemente las características de las propiedades del suelo en la a la profundidad de la capa afectada por la labranza, generalmente de 0 a 20 cm del perfil. Esta estratificación de las propiedades de suelo también promueve la distribución de las raíces de los cultivos siguiendo el mismo patrón de la distribución de MOS y nutrientes, es decir, la mayoría de las raíces activas del cultivo se localizan en las capas superiores de 0 a 10 cm de profundidad (Kay and VandenBygaart, 2002; Díaz-Zorita, *et al.*, 2004; Grove, *et al.*, 2007; Costantini, *et al.*, 2010; He, *et al.*, 2011; Abdollahi and Munkholm, 2014).

La investigación conducida por el grupo de suelos del CADET-FCAg-UCE en un Mollisol de origen volcánico (Entic Durustoll) localizado en Tumbaco, Quito, Pichincha, encontró la misma tendencia (**Cuadro 7.9**). Se observa el efecto del manejo del suelo con SD sobre el contenido de MOS y MOP luego de cuatro años de iniciado el experimento. Se considera que la MOP es un parámetro sensible para indicar el efecto del manejo agronómico y es el que provee más rápidamente información sobre el futuro contenido de MOS total, debido a que la MOP alcanza rápidamente un nuevo equilibrio luego de un episodio de manejo del suelo como la rotación de cultivos o las diferentes formas de labranza. Una reducción en el contenido de MOP se correlaciona con el declive en las características de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo lo que finalmente repercute en el rendimiento de los cultivos y en la calidad del suelo (Galantini, *et al.*, 2008; Videla, *et al.*, 2008; Ghisolfi, 2011; Lehmann and Kleber, 2015).

Cuadro 7.9. Efecto de la labranza sobre el contenido de materia orgánica y materia orgánica particulada en un Mollisol de origen volcánico (Entic Durustoll) a tres profundidades. Lote A2. CADET, Tumbaco, Quito, Pichincha. Adaptado de Ávila (2019) y Serrano (2020).

Año de evaluación	Labranza	Profundidad de muestreo (cm)		
		0-5	5-10	10-20
Contenido de MOS (%)				
2017	SD	1.56	1.45	1.34
	LC	1.55	1.45	1.48
2019	SD	1.85 a*	1.36	1.20
	LC	1.25 b	1.24	1.22
Contenido de MOP (% de la MOS)				
2019	SD	41 a	26	22
	LC	27 b	24	18

* Medias con diferente letra indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey 0.05).

El incremento en MOS logrado con la implementación de SD favorece notoriamente la estructura del suelo, característica que su vez se relaciona con el tamaño, forma, disposición y continuidad de los espacios porosos. La estructura es el resultado de la agregación de las partículas del suelo por medio de puentes iónicos y por la floculación y la cementación promovida por el carbono orgánico, la biota y las arcillas del suelo (Bronick and Lal, 2005). En consecuencia, el mayor contenido de MOS logrado con SD mejora la porosidad y estabilidad de los agregados lo que mejora la retención del agua por el suelo (Green, *et al.*, 2007; Ball, *et al.*, 2010; Abdollahi and Munkholm, 2014). La estabilidad de los agregados se utiliza como un indicador de la calidad del suelo (Six and Paustian, 2014). Los efectos de la SD en la capacidad de retención de humedad del suelo derivadas del mejoramiento de las propiedades físicas de un Mollisol de origen volcánico fueron documentados por Montesdeoca *et al.* (2020) y Montesdeoca (2021) (**Cuadro 7.10**). Se observa el efecto de la labranza en la mejor disponibilidad de agua luego de los tres ciclos de dos rotaciones de cultivos sembradas con SD.

Cuadro 7.10. Efecto de la labranza sobre la capacidad de almacenamiento de agua en un Mollisol de origen volcánico (Entic Durustoll) a dos profundidades. Lote A4. CADET, Tumbaco, Quito, Pichincha. Adaptado de Montesdeoca, *et al.* (2020) y Montesdeoca (2021).

Labranza	Rotaciones			
	Fréjol-maíz-fréjol		Fréjol-amaranto-frejol	
Profundidad de muestreo (cm)				
	0-5	5-20	0-5	5-20
Capacidad de almacenamiento de agua (%)				
SD	24.8 a *	23.7 a	22.0 a	22.3 a
LC	21.1 b	20.7 b	19.2 b	20.9 b

* Medias con diferente letra indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey 0.05).

Se ha demostrado que la SD también incrementa la presencia de microorganismos como bacterias y comunidades de hongos en el suelo, incluyendo las micorrizas arbusculares (MA) que al asociarse con las raíces de los cultivos regulan el comportamiento de la estructura del suelo (Borie, *et al.*, 2008; Dai, *et al.*, 2015). Uno de los productos del metabolismo de las MA es la glomalina, una glicoproteína que forma parte de la pared celular de las hifas del hongo. La glomalina se relaciona con las proteínas del suelo actuando como un adhesivo hidrofóbico de las partículas elementales (arena, limo y arcilla) ayudando a la formación de los agregados en el suelo (Driver, *et al.*, 2005). Por otro lado, la SD también beneficia a la población de macroorganismos benéficos, entre ellos las lombrices, organismos que con su actividad mejoran la estructura y permiten la formación de poros para facilitar la aireación e infiltración y, además, contribuyen a la estabilidad de los agregados (Domínguez, *et al.*, 2009). La presencia de lombrices es también considerada como un indicador de la calidad del suelo (Cabrera-Dávila, *et al.*, 2017). El efecto de la SD sobre la presencia de lombrices en suelo volcánico sembrado con dos rotaciones y en la acumulación de nódulos fijadores de N en las raíces de fréjol se presenta en el **Cuadro 7.11**. En la **Figura 7.66** se presentan ejemplos de cultivos bajo SD en el CADET-FCAg-UCE.

Cuadro 7.11. Efecto de la labranza sobre la presencia de lombrices y en la acumulación de nódulos en las raíces del fréjol en un Mollisol de origen volcánico (Entic Durustoll) en dos rotaciones de cultivos. Lote A4. CADET, Tumbaco, Quito, Pichincha. Adaptado de Montesdeoca (2021).

Labranza	Rotaciones			
	Fréjol-maíz-fréjol		Fréjol-amaranto-frejol	
Profundidad de muestreo (cm)				
	0-5	5-20	0-5	5-20
Biomasa de lombrices (g m⁻²)*				
SD	54.0 a**	16.3 a	35.4 a	15.4 ns
LC	27.5 b	4.5 b	6.9 b	8.1 ns
Población de lombrices (individuos m⁻²)*				
SD	148 a	148 a	152 a	50 ns
LC	100 b	82 b	52 b	44 ns
Rhizobium (nódulos planta⁻¹)*				
SD	127 a		71 a	
LC	30 b		37 b	

* Muestreo al final de las rotaciones

** Medias con diferente letra indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey 0.05).

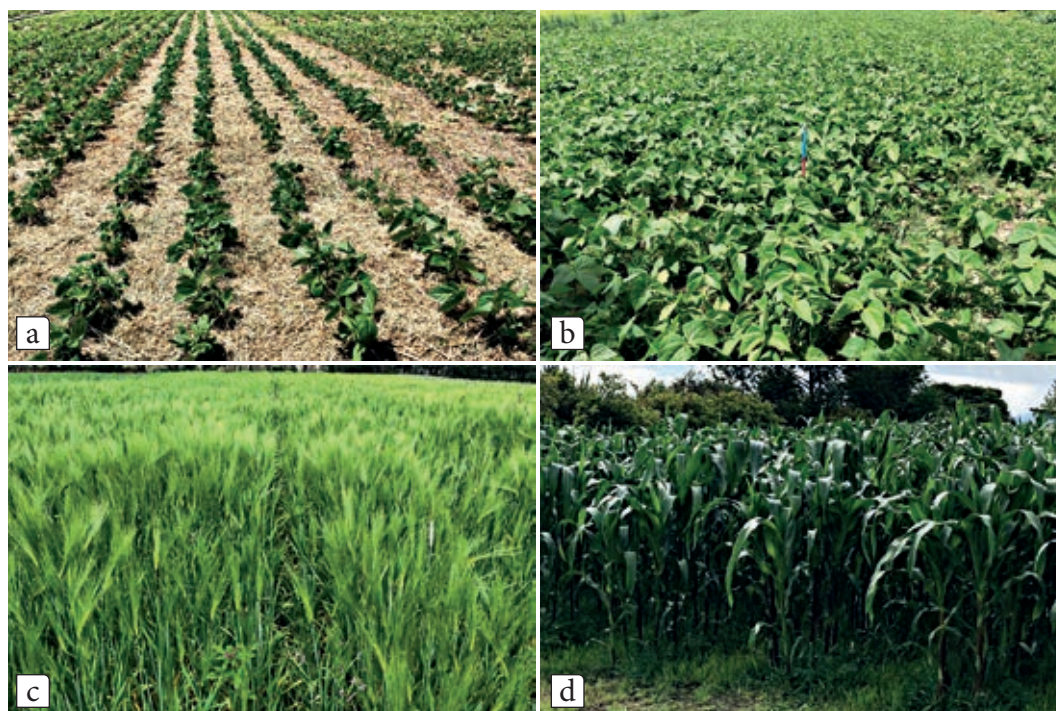


Figura 7.66. Siembra directa en varios cultivos. **a)** Rotación fréjol-amaranto-fréjol; **b)** Rotación fréjol-maíz; **c)** Rotación cebada-maíz-fréjol; **d)** Rotación maíz-fréjol. Fotos tomadas en los experimentos conducidos por el grupo de suelos en el CADET-FCAg-UCE.

7.8. Necesidad de un programa nacional de control de erosión

Ecuador necesita desarrollar en forma inmediata un Plan Nacional de Manejo y Conservación de Suelos que controle la erosión, manejando los efectos de la lluvia y la pendiente. Como ya se indicó, esto se logra utilizando prácticas mecánicas y agronómicas de control de erosión, en su mayoría, simples y de poco costo. Si bien todo esto es materialmente posible, quizá el principal reto es convencer a las entidades gubernamentales y privadas, y al mismo agricultor, de la necesidad urgente de desarrollar un Programa Nacional de Control de Erosión, particularmente si se toma en cuenta los efectos innegables del cambio climático que incrementarían la intensidad de las precipitaciones en varias zonas en el país (Cáceres, *et al.*, 2018).

A través de los años se han escuchado voces y opiniones que claramente han pedido tomar acción para controlar el grave problema de pérdida de suelo de las áreas de producción agrícola del país. Acosta Solís fue uno de los primeros científicos que documentó la naturaleza de la erosión en Ecuador y definió medidas de control (Acosta Solís, 1952). El desarrollo de la economía y el crecimiento de la población durante las siguientes décadas expandieron la frontera agrícola e incrementaron la presión sobre la tierra desencadenando un agresivo proceso erosivo. Un estudio conducido por Fundación Natura en 1981 sobre el estado del ambiente en Ecuador demostró que el principal problema ambiental, en ese momento, era la pérdida de suelo por erosión (Espinosa, 1981). Ese mismo año, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) desarrolló e implementó un proyecto de Conservación y Manejo de Suelos que condujo actividades en el campo hasta 1986. Este proyecto entrenó a más de 500 técnicos de nivel medio y profesionales en todo el país. Estas personas debieron ser la base para implementar un plan nacional de Conservación de Suelos. Al mismo tiempo se creó en el Ministerio de Agricultura (MAG) el Programa Nacional de Conservación de Suelos (PRONACOS) como extensión del PRONAREG. El proyecto del INIAP no continuó con sus actividades luego de 1986, pero INIAP retomó su trabajo a pequeña escala a nivel de cuencas hidrográficas (Córdova y Novoa, 1995). PRONACOS desapareció como entidad pública dos años después de su creación debido a la reorganización del MAG. Varias instituciones privadas como CARITAS desarrollaron también actividades de campo para control de erosión por varios años. A través del tiempo se han hecho llamados de diferente tipo, por diferentes medios, para desarrollar acciones efectivas de control de erosión en Ecuador (Jiménez, 2011; Podwokewski and Poulénard, 2011; Ochoa, *et al.*, 2013; Espinosa, 2014), pero hasta el momento no existe un Programa Nacional de Conservación de Suelos y el hecho claro e innegable es que el suelo en Ecuador se continúa perdiendo a paso acelerado.

En las condiciones actuales, el Programa Nacional de Manejo y Conservación de Suelos contaría con abundante información básica sobre la magnitud del proceso erosivo compilada y publicada por el Ministerio de Agricultura (MAG) y por el Instituto Geográfico Militar (IGM), que absorbió las competencias del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) y éste del Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), a través de proyectos como el SIGTIERRAS y otros. Todas estas herramientas harían más fácil y efectiva la planificación y las acciones de conservación de suelos en el país.

7.9. Comentarios finales sobre la erosión en Ecuador

En Ecuador, la erosión ha degradado el suelo, ha reducido la capacidad de producción de los campos y ha tenido un profundo impacto en la economía de pequeños y grandes agricultores. Sin embargo, también el problema tiene consecuencias indirectas sobre los habitantes de zonas urbanas. La acumulación de sedimentos en las obras de infraestructura y la destrucción de caminos son ejemplos comunes.

Es también cierto que no existe una percepción clara de cómo atacar el problema y de qué acciones concretas podrían efectuarse en el campo, tanto a nivel regional como a nivel de parcela, a pesar de que la metodología para controlar erosión es conocida y está disponible. Se ha demostrado la factibilidad de controlar la erosión del suelo, pero esta información está concentrada en pocos grupos relacionados con agricultura y no llega a los agricultores.

Los agricultores perciben de manera general que algo anda mal en el manejo de las parcelas. Esta percepción viene del hecho de que los rendimientos de los cultivos son cada vez más bajos y que el suelo es cada vez más difícil de manejar. Sin embargo, cuando se sugiere la implementación de alguna práctica de conservación, los agricultores la rechazan porque consideran que complica el manejo normal de la parcela y es aparentemente costosa. El desarrollar conciencia sobre control de erosión en medios alejados a la agricultura podría ser aún más difícil. Muchos consideran que no son parte del problema; sin embargo, son receptores indirectos de los problemas de erosión causados en zonas rurales.

Un Programa Nacional de Conservación de Suelos requiere de considerable inversión y sus resultados no son visibles inmediatamente. Estos dos factores no han permitido lograr el apoyo de los sectores políticos en el pasado. Parecería que las condiciones políticas del país han cambiado en los últimos años y se ha generado un ambiente favorable para implementar un proyecto de esta naturaleza que podría iniciarse con la estructura ya existente en el MAGAP, con el apoyo de otras organizaciones del agro y asociaciones de productores, así como de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD), varios de los cuales han conducido un trabajo efectivo en la habilitación de cangahua.

Finalmente, es imperativo un cambio radical en el enfoque de los programas de extensión agrícola que conducen los diferentes organismos gubernamentales y privados. La extensión agrícola debe girar alrededor de conservación de suelos, en otras palabras, toda acción de tipo agrícola solamente debería iniciarse luego de que se haya resuelto el potencial problema de erosión del sitio.

7.10. Referencias Bibliográficas

- Abdollahi, L. and L. Munkholm. 2014. Tillage system and cover crop effects on soil quality: I. Chemical, mechanical, and biological properties. *Soil Science Society of America Journal* 78(1): 262-270.
- Acosta, M. y O. Galárraga. 2011. Efecto de la siembra directa sobre el suelo, desarrollo y rendimiento de dos ciclos sucesivos de maíz, bajo diferentes arreglos de siembra y formas de aplicación de nitrógeno. Departamento de Ciencias de la Vida, Carrera de Ciencias Agropecuarias. Escuela Politécnica del Ejército. Ingeniero Agropecuario. Quito, Ecuador. 135 p
- Acosta Solís, M. 1952. Por la conservación de las tierras andinas: la erosión en el Ecuador y métodos aconsejados para su control. Publicaciones Científicas MAS. Quito, Ecuador.
- Aguayo, J. 2016. Impacto de la erosión del suelo sobre la productividad y rentabilidad del maíz (*Zea mays* L.) en la zona de Mocache. Escuela de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Ecuador. 69 p
- Alapin, H. 2008. Rastrojos y algo más: Historia de la siembra directa en Argentina. Teseo. Buenos Aires, Argentina.
- Almeida, G., G. Trujillo, G. de Noni, A. Winckell y J. Nouvelot. 1984. Los principales procesos erosivos del Ecuador. MAG-PRONACOS. Quito-Ecuador. <https://bit.ly/36D3wZT>
- Almorox, J., F. López y S. Rafaelli. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación. Universidad de Murcia. Murcia, España.
- Alvarado, S., R. Jaramillo, F. Valverde y R. Parra. 2011. Manejo de nutrientes por sitio específico en el cultivo de maíz bajo labranza de conservación para la provincia de Bolívar. INIAP-IPNI. Quito, Ecuador.
- Álvarez, C. y M. Barraco. 2005. Efecto de los sistemas de labranza sobre las propiedades edáficas y rendimiento de los cultivos. En: C. Álvarez y M. Barraco (eds). Indicadores de calidad física de suelos. INTA. Buenos Aires, Argentina. p. 5-14.

- Alwang, J., G.W. Norton, V. Barrera and R. Botello. 2013. Conservation agriculture in the Andean highlands: Promise and precautions. In: S. Mann (ed). *The Future of Mountain Agriculture*. Springer. London, England. p. 21-38.
- Amores, F. 1992. Uso de labranza mínima en la producción de cultivos. *Comunicación Técnica*. Estación Experimental Tropical Pichilingue. Quevedo, Ecuador.
- Amores, F., D. Saquicela, W. Sarabia, O. Tarqui, I. Sotomayor y S. Vasco. 2014. Buenas prácticas para la renovación de huertas improductivas de cacao tradicional. *Manual Técnico N° 97*. Estación Experimental Tropical Pichilingue, INIAP. Quevedo, Ecuador.
- Arévalo, J. 2013. Evaluación de sistemas de labranza, cultivos de cobertura y rotación con maíz duro (*Zea Mays* L.) en la microcuenca del río Alumbre, cantón Chillanes, provincia Bolívar-Ecuador. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Estatal de Bolívar. Ingeniero Agrónomo. Guaranda, Ecuador. 168 p
- Asamblea Nacional. 2016. *Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales*. Asamblea Nacional. Quito-Ecuador.
- Ávila, O. 2019. Efecto de la labranza convencional y siembra directa en las propiedades químicas de un suelo sembrado con maíz y fréjol. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ing. Agrónomo. Quito, Ecuador. 104 p
- Baker, J. and K. Saxton. 2008. Los qué y los por qué de la agricultura de labranza In: J. Baker and K. Saxton (eds). *Siembra con labranza cero en agricultura de conservación*. FAO - Editorial Acirbia S. A. Zaragoza, España. p. 1-12.
- Baldock, J. and K. Broos. 2012. Soil organic matter. In: P. Huang, Y. Li and M. Sumner (eds). *Handbook of Soil Sciences*. CRC press. Boca Raton, USA.
- Ball, B., N. Balarezo, R. Jadir Aparecido, A. Pires da Silva and C. Tormena. 2010. Visual soil structure quality assessment on Oxisols under no-tillage system. *Scientia Agricola* 67(4): 479-482.
- Barrera, V., J. Alwang y E. Cruz. 2008. Manejo integrado de los recursos naturales para la agricultura de pequeña escala en la subcuenca del río Chimbo-Ecuador: aprendizajes y enseñanzas. INIAP-SAREM-CRSP-SENACYT. Editorial El Taller Azul. Quito-Ecuador.
- Becker, M. y S. Tuttillo. 2009. *Historia agraria y social de Cayambe*. Ediciones Abya Yala. Quito-Ecuador. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/catalog/resGet.php?resId=45261>
- Boardman, J. 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena* 68(2): 73-86.
- Borie, F., R. Rubio and A. Morales. 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. *J. Soil Sci. & Plant Nutr* 8(2): 9-18.
- Brassel, F., P. Ruiz y A. Zapatta. 2008. La estructura agraria en el Ecuador: una aproximación a su problemática y tendencias. En: F. Brassel, S. Herrera y M. Laforge (eds). *Reforma Agraria en el Ecuador: viejos temas nuevos argumentos*. SIPAE. Quito, Ecuador. p. 17-32.
- Bravo, C., B. Torres, D. Changoluisa, H. Marín, R. Alemán and R. Torres. 2016. Environmental impact of livestock systems in the Ecuadorian Amazon. In: Universidad Estatal Amazónica (ed). *Sicence Forum MOL2NET*. MOL2NET. Basel, Switzerland.
- Bronick, C. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124(1): 3-22.
- Burgos, L. 1997. Causas estructurales de la deforestación en la Amazonía ecuatoriana. *Ecuador Debate* 40: 168-185.

- Buste, C. 2019. Crecimiento de hijuelos de banano en respuesta al abonamiento potásico. Escuela de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Ecuador. 51 p
- Cabrera-Dávila, G., A. Socarrás-Rivero, G. Hernández-Vigoa, D. Ponce de León-Lima, Y. Menéndez-Rivero y J. Sánchez-Rendón. 2017. Evaluación de la macrofauna como indicador del estado de salud en siete sistemas de uso de la tierra, en Cuba. *Pastos y Forrajes* 40(2): 118-126.
- Cáceres, N., D. Rosero and M. Lane. 2018. What does the future hold? Historical climate analysis and projection of future climatic scenarios for the andean canton of Pedro Moncayo, Ecuador. *Revista Geográfica de América Central* 61(3): 297-318.
- Calero, A. y O. Vizueté. 2018. Por qué son frágiles los suelos de la Amazonía ecuatoriana? En: E. de Melo, C. Astorga, F. Casasola y C. Caicedo (eds). *Agroforestería Sostenible en la Amazonía Ecuatoriana*, N° 2. INIAP-CATIE. Quito, Ecuador.
- Campaña, F. 2015. Aplicación del Modelo RUSLE para el cálculo de erosión hídrica en la microcuenca del Río Perlaví. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ingeniero Agrónomo. Quito, Ecuador. 87 p
- Cangás, J. y G. Trujillo. 1997. Experiencia de recuperación de cangahua en la provincia de Carchi (Ecuador). En: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds). *Memorias del III Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos*. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador. p. 501-505.
- Cañadas, L. 1983. El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. Editores Asociados. Quito, Ecuador.
- CEDEGE. 1970. Proyectos identificados en la Cuenca del Río Guayas. CEDEGE. Guayaquil, Ecuador.
- CEPAL y Patrimonio Natural. 2013. Amazonia posible y sostenible. CEPAL-Patrimonio Natural. Bogotá, Colombia.
- Chela, E. 2008. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres sistemas de producción en la microcuenca de la quebrada Chilcapamba, cantón Chillanes, provincia de Bolívar. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad Estatal de Bolívar. Ingeniero Agrónomo. Guaranda-Ecuador. 72 p
- Chen, Y. and T. Aviad. 1990. Effects of humic substances on plant growth. *Soil Biology & Biochemistry* 34: 1527-1536.
- Chila, M. 2021. Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz (*Zea mays* L.) cultivado comercialmente en terrenos con pendiente variable. Escuela de Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Ecuador. 84 p
- Chila, M. y F. Amores. 2019. El crecimiento y producción de maíz duro disminuyen con la siembra en terrenos inclinados recortando el retorno de la inversión, zona de Balzar. En: F. Abasolo y H. Canchignia (ed). *Memorias del X Congreso Latinoamericano de Agronomía*. Centro de Investigación y Desarrollo. Quevedo, Ecuador. UTEQ-Proyecto América-CIDE-MAG. Quevedo, Ecuador.
- CLIRSEN, SENPLADES, MAGAP y SIGAGRO. 2009. Memoria técnica de clima e hidrología. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales en la cuenca del río Guayas escala 1: 25 000. CLIRSEN. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/2mpuf8F>
- Córdova, J. y V. Novoa. 1995. Problemática, experiencia y enfoque sobre la erosión, manejo y conservación de suelos de ladera en el Ecuador. En: IICA (ed). *Manejo de Cuencas Hidrográficas*. IICA. Lima, Perú.
- Cortés, A. 2004. Suelos Colombianos. Una mirada desde la academia. Universidad de Bogota-Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia.

- Costantini, A., C. Alvarez, C. Álvarez, E. Martellotto y E. Lovera. 2010. Uso de la relación de estratificación del carbono orgánico como indicador de efectos del manejo sobre el suelo y el secuestro de carbono. En: C. Videla (ed). XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 31 de mayo al. AACCS. La Plata, Argentina.
- Craswell, E. and R. Lefroy. 2001. The role and function of organic matter in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61: 7-18.
- Crovetto, C. 2006. No-tillage: The relationship between no tillage, crop residues, plants and soil nutrition. *Therma Impresores SA*. Hualpén, Chile.
- Custode, E. y M. Sourdat. 1986. Paisajes y suelos de la Amazonía ecuatoriana: entre la conservación y la explotación. *Revista del Banco Central del Ecuador* 24: 325-339.
- Custode, E., G. Trujillo, C. Valarezo y A. Voope. 1999. Manejo y conservación de suelos. La degradación del suelo y los cambios históricos. Consorcio CAMAREN. Quito-Ecuador.
- Custode, E. y M. Viennot. 1986. El riesgo de erosión en la región Amazónica. En: N. Gómez, J. León, P. Peltre y H. Vargas (eds). *La erosión en el Ecuador*. CEDIG-ORSTOM. Quito-Ecuador. p. 79-88.
- Dahlgren, R., M. Saigusa and F. Ugolini. 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy* 82: 113-182.
- Dai, J., J. Hu, A. Zhu, J. Bai, J. Wang and X. Lin. 2015. No tillage enhances arbuscular mycorrhizal fungal population, glomalin-related soil protein content, and organic carbon accumulation in soil macroaggregates. *Journal of Soils and Sediments* 15(5): 1055-1062.
- Dantur, N. 2011. La siembra directa y las nuevas tecnologías al servicio de la producción agrícola. *Avance Agroindustrial* 34(3): 15-19.
- de la Rosa, D. 2008. Evaluación agro-ecológica de suelos: para un desarrollo rural sostenible. Mundi-Prensa. Madrid-España.
- de Noni, G. 1986. Breve visión histórica de la erosión en el Ecuador. ORSTOM. Quito, Ecuador.
- de Noni, G. y G. Trujillo. 1999a. La erosión actual y potencial en Ecuador: Localización, manifestación y causas. ORSTOM. Quito, Ecuador.
- de Noni, G. y G. Trujillo. 1999b. Los principales procesos erosivos en el Ecuador. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Quito, Ecuador.
- de Noni, G., G. Trujillo y M. Viennot. 1992. Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador. En: C. Zebrowski, C. Prat, J. Etchevers, H. Arias y M. Miranda (eds). *I Simposio internacional Suelos volcánicos endurecidos*. Terra. México. p. 503-514.
- de Noni, G. et M. Viennot. 1994. Les recherches sur l'érosion par l'ORSTOM, évolution et perspectives : cas de la montagne équatorienne. In: ORSTOM (ed). *Les écosystèmes intertropicaux, Fonctionnement et Usage*. ORSTOM. Lyon, France.
- de Noni, G., M. Viennot y G. Trujillo. 1997. La erosión agrícola de los suelos en el Ecuador. En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). *Los paisajes naturales del Ecuador*. Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica (CEDIG) - IPGH (Sección Ecuador) - ORSTOM (Francia) - IGM. Quito, Ecuador.
- Dehn, M. 1995. An Evaluation of Soil Conservation Techniques in the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development* 15: 175-182.
- Dercon, G., J. Deckers, G. Govers, J. Poesen, H. Sánchez, R. Vanegas, *et al.* 2003. Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador. *Soil and Tillage Research* 72(1): 31-41.

- Dercon, G., J. Deckers, J. Poesen, G. Govers, H. Sánchez, M. Ramírez, *et al.* 2006. Spatial variability in crop response under contour hedgerow systems in the Andes region of Ecuador. *Soil and Tillage Research* 86(1): 15-26.
- Dercon, G., G. Govers, P. Poesen, H. Sánchez, R. Rombaut, G. Vandembroeck, *et al.* 2007. Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador. *Geomorphology* 87: 4-15.
- Derpsch, R. 2008. Critical steps in no-till adoption. *No-Till Farming Systems. Special Publication (3)*: 479-495.
- Derpsch, R. 1998. Historical review of no-tillage cultivation of crops. In: FAO (ed). *Proceedings of the 1st JIRCAS Seminar on Soybean Research: No-tillage Cultivation and Future Research Needs*. JIRCAS. Iguassu Fall, Brazil.
- Derpsch, R., T. Friedrich, A. Kassam and H. Li. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3(1): 1-25.
- Díaz-Zorita, M., M. Barraco y C. Alvarez. 2004. Efectos de doce años de labranzas en un Hapludoll del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 22(1): 11-18.
- Domínguez, A., J. Bedano y A. Becker. 2009. Cambios en la comunidad de lombrices de tierra (Annelida: Lumbricina) como consecuencia del uso de la técnica de siembra directa en el centro-sur de Córdoba, Argentina. *Ciencia del suelo* 27(1): 11-19.
- Donoso, M. 2009. La cuenca del río Paute: diagnóstico y propuesta de manejo integral. *Políticas de desarrollo agropecuario*. PROMAS. Cuenca, Ecuador.
- Driver, J., W. Holben and M. Rillig. 2005. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry* 37(1): 101-106.
- Dumanski, J., R. Peiretti, J. Benites, D. McGarry and C. Pieri. 2006. The paradigm of conservation agriculture. *Proc. World Assoc. Soil Water Conservation* 1: 58-64.
- Eglitis Media. 2021. Crecimiento demográfico del Ecuador. Disponible en: <https://www.datosmundial.com/america/ecuador/crecimiento-poblacional.php>
- Ekboir, J. 2002. Developing no-till packages for small-scale farmers. In: J. Ekboir (ed). *CIMMYT 2000-2001 World Wheat Overview and Outlook*. CIMMYT. México. p. 1-37.
- ESPAC. 2017. Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC. Quito, Ecuador.
- Espinosa, J. 2014. La erosión en Ecuador, un problema sin resolver. *Siembra* 2: 56-70.
- Espinosa, J. 1981. El recurso suelo en el Ecuador. En: L. Carrera (ed). *Diagnóstico de la situación del medio ambiente en el Ecuador*. Fundación Natura-USAID Technical Information Center. Quito, Ecuador.
- Espinosa, J. y F. Maldonado. 1987. Logros y problemas de la conservación del suelo. En: F. Maldonado (ed). *Conferencia Usos Sostenidos de Tierra en Laderas*. DESFIL-USAID. Quito, Ecuador.
- Espinosa, J. and J. Moreno. 2018. Agricultural land use. In: J. Espinosa, J. Moreno and G. Bernal (eds). *The Soils of Ecuador*. World Soils Book Series. Springer. Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0_6
- Espinosa, J. y P. Mothes. 1991. Los suelos volcánicos del Ecuador. En: N. Gómez, P. Peltre, L. Mora y G. Bustos (eds). *El paisaje volcánico de la sierra ecuatoriana: geomorfología, fenómenos volcánicos y recursos asociados*. Corporación Editora Nacional. Quito, Ecuador. p. 92.
- Espinosa, P. 1993. Caracterización por erosión de las cuencas hidrográficas de la Sierra ecuatoriana. CIP. Quito, Ecuador.

- Fawcett, R.S. and D. Towery. 2003. Conservation tillage and plant biotechnology: how new technologies can improve the environment by reducing the need to plow. Conservation Technology Information Center. West Lafayette, Indiana, USA.
- Fiallos, J. 2017. Importancia del sector agrícola en una economía dolarizada. Colegio de Administración y Economía, Universidad San Francisco de Quito. Economista. Quito, Ecuador. 77 p
- FLACSO, MAE y PNUMA. 2008. Capítulo 4: Estado del suelo. En: FLACSO (ed). GEO Ecuador 2008. Informe sobre el estado del medio ambiente. FLACSO. Quito, Ecuador.
- Foubert, M. 2015. Sistematización de experiencias de sistemas de producción en cangahuas habilitadas en la parroquia Pimampiro. UCE – Prefectura de Imbabura de Ibarra – MAGAP – IRD – Montpellier SupAgro. Quito, Ecuador.
- Friedrich, T., R. Derpsch and A. Kassam. 2017. Overview of the global spread of conservation agriculture. In: K. Etingoff (ed). Sustainable Development of Organic Agriculture: Historical Perspectives. Apple Academic Press. Ontario, Canada. p. 53-68.
- Galantini, J., J. Iglesias, M. Landriscini, L. Suñer y G. Minoldo. 2008. Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. En: J. Galantini (ed). Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. p. 71-96.
- García, L. y J. Schlatter. 2012. Caracterización de suelos a lo largo de un gradiente altitudinal en Ecuador. Revista Brasileira de Ciências Agrárias 7(3): 456-464.
- Gattinger, A., J. Jawtusich, A. Müller and P. Mäder. 2011. No-till agriculture, a climate smart solution? Misereor. Aachen, Germany.
- Gaybor, A. 2018. Análisis exploratorio hacia la comprensión de evolución tecnológica del riego en el Ecuador. Revista Economía 70(112): 33-51.
- Ghisolfi, E. 2011. Contenido de materia orgánica en relación con la fertilidad del suelo en siembra directa. Eduvim. Buenos Aires, Argentina.
- González, A., J. Moreno, R. Lucero, H. Velásquez y T. Yugcha. 2002. Informe final del proyecto “Generación de Información Georeferenciada para el Desarrollo Sustentable del Sector Agropecuario”. MAG-IICA-CLIRSEN. Quito, Ecuador.
- Green, V., D. Stott, J. Cruz and N. Curi. 2007. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. Soil and Tillage Research 92(1): 114-121.
- Grove, J., R. Ward and R. Weil. 2007. Nutrient stratification in no-till soils. Agron. J 65: 781-783.
- Guadamud, B. y F. Amores. 2019. Pequeños productores de maíz enfrentan los riesgos del entorno ambiental con medidas de adaptación agro socio económica, zona de Mocache. En: F. Abasolo y H. Canchignia (ed). Memorias del X Congreso Latinoamericano de Agronomía. UTEQ-Proyecto América-CIDE-MAG. Quevedo, Ecuador.
- Hall, M. y P. Mothes. 1997. El origen y edad de la cangahua superior, Valle de Tumbaco, Ecuador. En: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds). III Symposium Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador. p. 19-28.
- Harden, C. 1993. Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an Andean drainage basin in Ecuador. Mountain Research and Development 13(2): 177-184.
- Haro, R. 2020. Estimación de la erosión actual de la Sierra Norte del Ecuador, utilizando Geoinformación. Facultad de Ciencias Agrícolas. Consejo de Posgrado, Universidad Central del Ecuador. Magíster en Gestión Integrada de Recursos Hídricos y Riego. Quito, Ecuador. 138 p

- Havlin, J., J. Beaton, S. Tisdale and W. Nelson. 2014. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. Eight ed. Pearson Prentice Hall.
- He, J., H. Li, R. Rasaily, Q. Wang, G. Cai, Y. Su, *et al.* 2011. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat–maize cropping system in North China Plain. *Soil and Tillage Research* 113(1): 48-54.
- Henry, A., L. Mabit, R. Jaramillo, Y. Cartagena and J. Lynch. 2013. Land use effects on erosion and carbon storage of the Río Chimbo watershed, Ecuador. *Plant and soil* 367(1): 477-491.
- Hidalgo, F. 1998. Los antiguos paisajes forestales del Ecuador. Una reconstrucción de sus primitivos ecosistemas. ABYA-YALA. Quito-Ecuador.
- Hidrobo, J., M. da Costa, C. Prat, G. Trujillo, J. Moreno y C. Ortega. 2015. Sistemas de producción en áreas con cangahua habilitada en la Sierra Norte de Ecuador. *Siembra* 2: 116-127.
- Hillel, D. 1992. *Out of the Earth: Civilization and the Life of the Soil*. Univer. of California Press. Los Angeles-USA.
- IDEA. 1988. Memorias del Seminario y Estudio Técnico: Políticas de manejo de suelos y aguas en tierras agrícolas de la Cuenca del Río Guayas. Quito, Ecuador. IDEA.
- IGM y IEE. 2008. El hombre y la erosión en el Ecuador. *Revista Geográfica IGM* 27(1): 10-18.
- IICA-PROCIANDINO. 1995. Problemática, experiencias y enfoque sobre la erosión, manejo y conservación de suelos de ladera en Ecuador. En: REDAMACS (ed). *La erosión, manejo y conservación de suelos de ladera en la Subregión Andina*. PROCIANDINO. Lima-Perú. p. 14-20.
- INAMHI. 2015. Anuario Meteorológico N^o 52 2012. INAMHI. Quito, Ecuador.
- INERHI. 1981. Evaluación de los recursos hidrológicos superficiales del Ecuador. INERHI. Quito-Ecuador.
- INIAP. 1990. Informe Anual. Departamento Nacional de Manejo de Suelo y Agua, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Quevedo, Ecuador.
- INTA. 2011. Siembra directa. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Buenos Aires, Argentina.
- Islam, R. and R. Reeder. 2014. No-till and conservation agriculture in the United States: an example from the David Brandt farm, Carroll, Ohio. *International Soil and Water Conservation Research* 2(1): 97-107.
- Jaramillo, J. 2015. Estudio del riesgo por erosión hídrica del suelo utilizando el modelo USLE mediante herramientas SIG aplicando en la subcuenca río Portoviejo, provincia de Manabí. Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Instituto de Investigación y Posgrado, Universidad Central del Ecuador. Magister en Sistemas de Información Geográfica. Quito, Ecuador. 143 p
- Jiménez, R. 2020. Efecto de varias alternativas de abonamiento mineral bajo condiciones de riego para optimizar el rendimiento del cultivo de soya (*Glycine max*). Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Ecuador. 79 p
- Jiménez, S. 2011. Erosión del suelo en Ecuador. CTT-USFQ - Fundación Carolina. Quito, Ecuador. <http://observatoriopoliticaambiental.org/categoria-indicadores/89-indicadores-de-cambio-climatico/71-la-erosion-del-suelo-en-el-Ecuador>
- Jiménez, W., V. Loayza y E. Metzler. 2018. Mapeo de cangahuas mediante teledetección en el Ecuador. *Siembra* 5(1): 38-50.
- Jiménez, W., C. Montúfar y C. Prat. 2016. Cartografía de suelos con cangahuas mediante teledetección en los cantones de Cayambe, Pedro Moncayo y Pimampiro, Sierra Norte de Ecuador. En: J. Espinosa, S. Alvarado y R. Jaramillo (ed). XXI Congreso Latinoamericano y XV Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador.

- Kay, A. and A. VandenBygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil & Tillage Research* 66 (2002) 107–118 66: 107-118.
- Kertész, Á. and B. Madarász. 2014. Conservation agriculture in Europe. *International Soil and Water Conservation Research* 2(1): 91-96.
- Lal, R. 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development* 17(2): 197-209.
- Lal, R. 2011. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food policy* 36: S33-S39.
- Lal, R. 2017. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: R. Lal (ed) *Soil erosion research methods*. Routledge-England. p. 1-10.
- Landers, N. 2004. Desarrollo de la siembra directa en el Brasil Tropical. FAO. Roma, Italia.
- Lehmann, J. and M. Kleber. 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528(7580): 60-68.
- López, V., F. Espíndola, J. Calles y J. Ulloa. 2019. Amazonía ecuatoriana bajo presión. *EcoCiencia*. Quito, Ecuador.
- Loza, R. 1995. El problema de la desertificación en el Ecuador INEFAN. Quito-Ecuador.
- MAG. 1999. Sistema de monitoreo ambiental en el sector agropecuario del Ecuador. Diagnóstico y línea base. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Quito-Ecuador.
- MAG. 2017. Mapa de cangahuas superficiales en el Ecuador continental, escala 1:25 000. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria. Quito, Ecuador.
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015a. Manual de procedimientos de geopedología. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1 y 2. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3i6FP2L>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015b. Memoria técnica del cantón Aguarico. Geopedología y temáticas derivadas. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3zJSajM>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015c. Memoria técnica del cantón Orellana. Geopedología y temáticas derivadas. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/36N8ukI>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015d. Memoria técnica del cantón Sucumbíos. Geopedología y temáticas derivadas. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3tdfOmg>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015e. Panorámica del perfil CSp-NVI_B4-85-0082. Memoria técnica del cantón Girón. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. <https://bit.ly/3i8ysH0>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015f. Panorámica del perfil CSp-NVI_B4-89-0078. Memoria técnica del cantón Nabón. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. <https://bit.ly/3kaO4fq>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015g. Panorámica del perfil CSp-NVI_D1-99-0058. Memoria técnica del cantón Saraguro. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. <https://bit.ly/3yTtvbN>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015h. Panorámica del perfil CSp-ÑV_E1-89-0021. Memoria técnica del cantón Azogues. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. <https://bit.ly/3eakaEe>

- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2015i. Panorámica del perfil CSp-ÑV_E3-87-0046. Memoria técnica del cantón Gualaceo. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. <http://bit.ly/2Cotrp2>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016a. Memoria técnica del cantón Archidona. Geopedología y temáticas derivadas. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3DVD6Ce>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016b. Memoria técnica del cantón Gonzalo Pizarro. Geopedología y temáticas derivadas. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/34sprPX>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016c. Memoria técnica del cantón Tena. Geopedología y temáticas derivadas. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 1. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2M5UBWY>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016d. Panorámica del perfil CSp-NV_D2-97-0009. Memoria técnica del cantón Cañar. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/36w9kUZ>
- MAGAP-SIGTIERRAS y Consorcio TRACASA/NIPSA. 2016e. Panorámica del perfil CSp-ÑVI_A1-97-0072. Memoria técnica del cantón Cuenca. Geopedología y temáticas derivadas. Anexo 5. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática escala 1: 25 000, lote 2. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/36OAHIK>
- Maldonado, E., F. Maldonado y C. Zebrowski. 1984. Suelos sobre proyecciones volcánicas del Ecuador. En: F. Maldonado (ed). VI Coloquio Internacional de Clasificación y Manejo de Suelos Volcánicos. SECS. Quito, Ecuador.
- Mejía, L. 1997. Suelos del Ecuador: Reconocimiento general en base a su capacidad-fertilidad y mapa general de clasificación por Capacidad-Fertilidad de los suelos del Ecuador: Una interpretación básica sobre las características de los suelos del Ecuador. FFJMD-INPOFOS-IGM-IPGH-SECS. Quito, Ecuador.
- Mena, C. 2010. Deforestación en el Norte de la Amazonía Ecuatoriana: del patrón al proceso. *Polémika* 2(5): 60-65.
- Metzler, E., W. Jiménez y V. Loayza. 2016. Cartografía de suelos con cangahuas superficiales en la parroquia Tocachi, Ecuador, a escala 1: 15 000. En: J. Espinosa, S. Alvarado and R. Jaramillo (ed). XXI Congreso Latinoamericano y XV Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador.
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2012. Panorámica del perfil PN6-P026. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional, escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3hyFw0k>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD Pichincha. 2013a. Perfil PM3-P140. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional. IEE. Quito-Ecuador. <http://bit.ly/2OtVnO4>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD Pichincha. 2013b. Perfil PM3-P143. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional. IEE. Quito-Ecuador. <http://bit.ly/2XCmASU>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD Pichincha. 2013c. Perfil PN2-P116. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional. Quito-Ecuador. <http://bit.ly/2QGnWKZ>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y GAD Pichincha. 2013d. Perfil PN8-P147. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional. IEE. Quito-Ecuador. <http://bit.ly/35g4KYn>
- MIDENA, SENPLADES, IEE y MAGAP. 2013e. Perfil PM2-P142. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional IEE. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2KCbKac>

- MIDENA, SENPLADES, IEE y MAGAP. 2014. Perfil PN7-P218. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional. IEE. Bolívar-Ecuador. <http://bit.ly/2XsDdjR>
- Miller, E. 1959. Agricultural Ecuador. *Geographical Review* 49(2): 183-207.
- Molina, A., G. Govers, J. Poesen, H. Van Hemelryck, B. De Bièvre and V. Vanacker. 2008. Environmental factors controlling spatial variation in sediment yield in a central Andean mountain area. *Geomorphology* 98(3): 176-186.
- Montesdeoca, F. 2021. Efecto de sistemas de labranza en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sembrado con dos rotaciones de cultivos. Datos no publicados. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Montesdeoca, F., M. Ávila, J. Quishpe, F. Borie, P. Cornejo, P. Aguilera, *et al.* 2020. Early changes in the transition from conventional to no-tillage in a volcanic soil cultivated with beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 36(3): 181-189.
- Moreno, J., F. Yerovi, M. Herrera, D. Yáñez and J. Espinosa. 2018. Soils from de Highlands. In: J. Espinosa, J. Moreno and G. Bernal (eds). *The Soils of Ecuador*. World Soils Book Series. Springer. Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0_3
- Nanzyo, M. and H. Kanno. 2018. *Inorganic constituents in soil*. Springer. Singapore.
- Nieto, C. y C. Caicedo. 2012. Análisis reflexivo sobre el desarrollo agropecuario sostenible en la Amazonía Ecuatoriana. Publicación Miscelánea N^a 405. INIAP-EECA. Joya de los Sachas, Ecuador.
- Novillo, I., M. Carrillo, J. Cargua, V. Moreira, K. Albán y F. Morales. 2018. Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas agrarios* 23(2): 177-187.
- Ochoa, P., A. Fries, D. Mejía, J. Burneo, J. Ruíz and A. Cerdà. 2016. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena* 140: 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.011>
- Ochoa, P., A. Fries, P. Montesinos, J. Rodríguez and J. Boll. 2013. Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of southern Ecuador. *Land Degrad. Dev* 10: 1002-1005.
- Ohl, C. and R. Bussmann. 2004. Recolonisation of natural landslides in tropical mountain forests of Southern Ecuador. *Feddes Repertorium: Zeitschrift für botanische Taxonomie und Geobotanik* 115(3-4): 248-264.
- Ortiz, F. 1990. *Los recursos naturales del Ecuador*. Fundación Natura-US AID. Quito, Ecuador.
- Pacheco, H., W. Méndez and A. Moro. 2019. Soil erosion risk zoning in the Ecuadorian coastal region using geo-technological tools. *Earth Sciences Research Journal* 23(4): 293-302.
- Pacheco, R. 2009. *El Ecuador: Recursos naturales agrícolas y del medio ambiente*. Imprenta Colón. Quito, Ecuador.
- Paredes, N., M. Angamarca, E. de Melo y H. Figueroa. 2018. El rol de los sistemas agroforestales en la conservación, recuperación y manejo de los suelos en sistemas de producción agropecuarios. En: E. de Melo, C. Astorga, F. Casasola y C. Caicedo (eds). *Agroforestería Sostenible en la Amazonía Ecuatoriana*, N^o 2. INIAP-CATIE. Quio, Ecuador.
- Pennock, D. 2019. *Soil erosion: the greatest challenge for sustainable soil management*. FAO. Rome, Italy.
- Perrachón, J. 2004. Siembra directa: qué es?. *Revista del Plan Agropecuario* 110(1): 54-57.
- Peters, T., T. Drobnik, H. Meyer, M. Rankl, M. Richter, R. Rollenbeck, *et al.* 2013. Environmental changes affecting the Andes of Ecuador. In: M. Caldwell, G. Heldmaier, R. Jackson, O. Lange, H. Mooney, E. Schulze and U. Sommer (eds). *Ecosystem services, biodiversity and environmental change in a tropical mountain ecosystem of South Ecuador*. Springer. p. 19-29.

- Pimentel, D. and M. Burgess. 2013. Soil erosion threatens food production. *Agriculture* 3: 443-463.
- Pineda, M. 2019. Efectos del cambio de uso del suelo y su proyección futura en la erosión hídrica en Ecuador continental. Facultad de Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja. Ingeniero en Manejo y Conservación del Ambiente. Loja, Ecuador. 53 p
- Pino, S., H. Aguilar, A. Apolo y L. Sisalema. 2018. Aporte del sector agropecuario a la economía del Ecuador. Análisis crítico de su evolución en el período de dolarización. Años 2000–2016. *Revista Espacios* 39(32): 7-15.
- Pittelkow, C., X. Liang, B. Linqvist, K. Van Groenigen, J. Lee, M.E. Lundy, *et al.* 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature* 517(7534): 365-368.
- Podwojewski, P. y J. Poulénard. 2011. Suelos de los páramos de Ecuador. En: P. Mena, A. Castillo, S. Flores, R. Hofstede, C. Josse, S. Lasso, G. Medina, N. Ochoa y D. Ortiz (eds). *Páramo*. Abya Yala. Quito, Ecuador.
- Poulénard, J., P. Podwojewski, J.-L. Janeau and J. Collinet. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45(3): 185-207.
- Prat, C., J. Moreno, J. Hibrobo, G. Trujillo, C. Ortega, J. Etchevers, *et al.* 2015. Turning rocks into soils from the Ecuadorian Andes to the Mexican Transvolcanic Sierra. In: R. Romeo, A. Vita, S. Manuellini, E. Zanini, M. Freppaz and S. Stanchi (eds). *Understanding mountain soils: a contribution from mountain areas to the International Year of Soils*. FAO. Rome, Italy.
- Raudes, M. y N. Sagastume. 2009. Manual de conservación de suelos. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central. Escuela Agrícola Panamericana. El Zamorano, Honduras.
- Rosado, K. 2021. Distribución espacial del grado de pendiente del terreno y su relación con la producción y rentabilidad de campos comerciales de maíz, en la zona de Ventanas. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Ecuador. 46 p
- Sánchez, M. 2015. Ecuador: Revisión a las principales características del recurso forestal y de la deforestación. *Revista Científica y Tecnológica UPSE* 3(1): 41-54.
- Santos, W. y D. Castro. 2012. Estudio de la pérdida del recurso suelo mediante el cálculo de tasas de erosión y propuesta de estrategias de manejo de suelos, determinadas por las características socio-ambientales de los Andes ecuatorianos. Escuela de Ciencias Geográficas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Ingeniero en Ciencias Geográficas. Quito, Ecuador. 136 p
- SENAGUA-DED. 2009. Estudio Exploratorio: Problemática y conflictos sobre los recursos hídricos por efectos del cambio climático. SENAGUA. Quito, Ecuador.
- Serrano, S. 2020. Efecto de dos sistemas de labranza sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad de cuatro especies vegetales (primer ciclo). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ing. Agrónomo. Quito, Ecuador. 93 p
- SIGTIERRAS. 2010. Ortofoto 1: 5 000. MAG-SIGTIERRAS. Quito, Ecuador.
- Six, J. and K. Paustian. 2014. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry* 68: A4-A9.
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to soil taxonomy. 10th ed. USDA - NRCS. Washington DC, USA. <http://bit.ly/2kEtubf>
- Southgate, D. and M. Whitaker. 1994. *Economic Progress and the Environment. One Developing Country's Policy Crisis*. Oxford University Press. New York.
- Suquilanda, M. 2008. El deterioro de los suelos en el Ecuador y la producción agrícola. En: J. Espinosa (ed). XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo Quito. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo.

- Taruchaín, A. 2020. Evaluación de la habilitación de cangahuas para la producción agrícola en San Miguel de Urququí. Facultad de Ciencia Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ing. Agrónomo. Quito, Ecuador. 98 p
- Tayupanta, J. y J. Córdova. 1990. Algunas alternativas agronómicas y mecánicas para evitar la pérdida de suelo. INIAP. Quito-Ecuador.
- Tello, A., N. Saltos, S. Romero, E. Tello, P. Romero, L. Vásquez, *et al.* 2019. Ecuador su realidad. Fundación José Peralta. Quito-Ecuador.
- Terán, G. 1997. La recuperación de suelos cangahuosos en el proyecto Licto En: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds). Memorias del III Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador. p. 506-510.
- Tigreros, G. 2017. Factores que contribuyen a la variación de la productividad del maíz entre fincas en el sector de Quinzaloma- La Ercilia. Escuela de Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Ecuador. 70 p
- Toapanta, O. 2016. Efecto de labranza convencional y siembra directa en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y en la producción de tres cultivos de la Sierra. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ingeniero Agrónomo. Quito, Ecuador. 81 p
- Towery, D. and S. Werblow. 2010. Facilitating Conservation Farming Practices and Enhancing Environmental Sustainability with Agricultural Biotechnology. Conservation Information Technology Center. West Lafayette, Indiana, USA.
- Trimble, S.W. and P. Crosson. 2000. US soil erosion rates: myth and reality. *Science* 289(5477): 248-250.
- Trujillo, G. y J. Arias. 1997. Productividad de la cangahua rehabilitada en Ecuador: Ensayos agronómicos. En: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds). III Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador. p. 260-271.
- Vanacker, V., G. Govers, S. Barros, J. Poesen and J. Deckers. 2003. The effect of short-term socio-economic and demographic change on landuse dynamics and its corresponding geomorphic response with relation to water erosion in a tropical mountainous catchment, Ecuador. *Landscape Ecology* 18(1): 1-15.
- Vasco, E. 2019. Efecto de la labranza convencional y siembra directa en las propiedades físicas de un suelo volcánico sembrado con maíz y fréjol. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ing. Agrónomo. Quito, Ecuador. 74 p
- Vera, R. y R. López. 1992. Tipología de la cangahua. En: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (ed). Primer Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo - ORSTOM. Montecillo, México. p. 113-119.
- Vergara, P. 2019. Respuesta del arroz (*Oryza sativa*) a diferentes alternativas de fertilización en un suelo bajo, sujeto a inundación temporal, cantón Mocache. Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Ecuador. 72 p
- Videla, L., C. Rostagno and M. Toyos. 2008. La materia orgánica particulada: comparación de métodos para su determinación y su valor como indicador de calidad de suelos del Chubut. *Ciencia del suelo* 26(2): 219-227.
- Villacís, B., D. Carrillo y A.G. Martínez. 2011. Estadística demográfica en el Ecuador: diagnóstico y propuesta. INEC. Quito-Ecuador.
- Wall, P. 1995. Siembra directa: perspectivas en áreas tropicales y subtropicales. En: J. Puignau (ed). Avances en Siembra Directa. IICA-PROCISUR. Montevideo, Uruguay.

- Winckell, A., C. Zebrowski y M. Sourdat. 1997. Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 2: Las regiones y paisajes del Ecuador. CEDIG-IPGH-IRD-IGM. Quito, Ecuador.
- Wingeyer, A., T. Amado, M. Pérez-Bidegain, G. Studdert, C. Perdomo, F. Garcia, *et al.* 2015. Soil quality impacts of current South American agricultural practices. *Sustainability* 7: 2213-2242.
- Winters, P., P. Espinosa y C. Crissman. 1998. Manejo de los recursos en los Andes ecuatorianos: revisión de literatura y evaluación del Proyecto Manejo del Uso Sostenible de Tierras Andinas (PROMUSTA) de CARE. Ediciones Abya Yala. Quito, Ecuador.
- WOCAT. 2020. World Overview of Conservation Approaches and Technologies. SLM Practices: Technologies and Approaches. Available in: <https://www.wocat.net/en/global-slm>.
- Wolf, T. 1892. Geografía y geología del Ecuador. Editorial Casa de la Cultura. Quito-Ecuador.
- Zambrano, X., A. Campos, O. Mendoza, J. Mendoza, E. Sinichenko and I. Gritsuk. 2020. Mathematical model to determine the runoff coefficient based on precipitation and curve number data, in the Manabi hydrographic demarcation, Ecuador. In: P. Jan Pahl, V. Galishnikova, N. Vatin, M. Kharun and D. Koroteev (ed). International Conference on Engineering Systems 2020. IOP Publishing. Moscow, Russia.
- Zamudio, C. y T. León. 2008. Transferencia y adopción de prácticas de agricultura de conservación del “proyecto Checua”, en los municipios de Caldas (Boyacá) y Nemocón (Cundinamarca). *Gestión y Ambiente* 11(2): 149-164.
- Zapatta, A. y P. Gasselin. 2005. El riego en el Ecuador: problemática, debate y políticas. CESA. Quito-Ecuador.
- Zebrowski, C. 1997. Los suelos con cangahua en el Ecuador. En: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds). *Memorias del III Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos*. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador. p. 128-138.
- Zebrowski, C. y B. Sánchez. 1997. Los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos. En: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds). *Suelos Volcánicos Endurecidos*. UE-ORSTOM-PUCE-UCE. Quito, Ecuador. p. 462-471.
- Zebrowski, C. y M. Sourdat. 1997. Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador. En: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). *Los paisajes naturales del Ecuador. Volumen 1: Las condiciones generales del medio natural*. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2kory6p>
- Zehetner, F., W. Miller and L. West. 2003. Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Sci. Soc. Am. J* 67(1): 1797-1809.
- Zuazo, V. and C. Pleguezuelo. 2008. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 28(1): 785-811.

CARACTERÍSTICAS -DE LOS SUELOS EN ECUADOR- Y SU MANEJO

José Espinosa, Consultor: jepinosa@fragaria.com.ec

Francisco Mite, Consultor: fmitev_24@yahoo.com

Soraya Alvarado, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador: spalvarado@uce.edu.ec

Julio Moreno, Instituto Geográfico Militar (IGM): vjmi76.jm@gmail.com

RESUMEN

El término suelo tropical es usado comúnmente para identificar cualquier suelo de los trópicos y se usa como sinónimo de suelos rojos muy meteorizados, ácidos e infértiles. Es verdad que los suelos con estas peculiaridades están localizados en los trópicos, pero no todos los suelos de los trópicos, y en particular los de Ecuador, tienen estas características. La modificación del normal proceso de meteorización, debido al cambio de la cantidad e intensidad de las lluvias, el aporte de nuevo material parental como la ceniza volcánica y la diferencia altitudinal y de temperatura que origina la cordillera de los Andes, generó la posibilidad de que Ecuador, un país localizado sobre la línea ecuatorial, tenga una variedad de suelos que soporta una de las mayores expresiones de diversidad de vida sobre el planeta. Desde el punto de vista de producción agrícola, la relación existente entre la mineralogía con la química y la fertilidad del suelo define las prácticas de manejo para las condiciones particulares de los suelos de Ecuador. Los suelos dominados por arcillas de tipo 2:1 como montmorillonita y vermiculita, que se caracterizan por tener carga permanente, deben manejarse de forma diferente a los suelos de carga variable como los suelos dominados por arcillas de rango corto como alofana, imogolita y complejos humus aluminio (suelos de origen volcánico) y aquellos dominados por caolinita y sesquióxidos de hierro y aluminio. La producción de cultivos se limita considerablemente cuando un suelo es ácido o cuando los contenidos de fósforo son bajos y el manejo de los suelos afectados por estas condiciones depende del tipo de carga eléctrica de las arcillas del suelo. El control de la acidez del suelo es una práctica común en las regiones con suelos ácidos en el mundo, sin embargo, el modificar el pH para lograr condiciones adecuadas para los cultivos depende del tipo de arcillas presentes en el suelo y, por esta razón, no existe una recomendación general de encalado para todos los suelos de Ecuador. De igual manera, las reacciones de adsorción (fijación) de fósforo ocurren con preferencia en los suelos de carga variable. Este capítulo discute ampliamente las condiciones que afectaron el material parental que llevaron a la presencia de suelos de carga permanente y carga variable en Ecuador y las estrategias para manejar acidez, salinidad y fósforo en los diferentes suelos del país.

ABSTRACT

The term tropical soil is commonly used to identify any soil from the tropics and is used as a synonym of red highly meteorized, acid and infertile soils. It is true that soils with these peculiarities are localized in the tropics, but not all soils in the tropics, particularly Ecuadorian soils, have these characteristics. The modification of the normal weathering process, due to the change in rainfall quantity and intensity, the contribution of new parent material like volcanic ash, and the difference in altitude and temperature caused by the Andes presence, allows the possibility for Ecuador, a country localized over the equatorial line, to hold a variety of soils that represent one of the greatest expressions of life diversity on the planet. From the agricultural production point of view, the relationship of soil mineralogy with soil chemistry and fertility defines the management practices for the conditions of Ecuadorian soils. Soil dominated by 2:1 clays like montmorillonite and vermiculite, which are characterized for having permanent charge, should be managed in a different way from the soils of variable charge such as the soils dominated by short range clays like allophane, imogolite and humus-Al complexes (soil of volcanic origin) and those dominated by kaolinite, and iron, and aluminum sesquioxides. Crop production is severely limited when a soil is acid or when phosphorus (P) content is low, and the management of soils affected by these conditions depends on the clays electrical charge. Soil acidity control is a common practice in several regions around the world where soils are acidic. However, pH modification to achieve adequate soil conditions for crops differs on the type of clays present in the soil and, for this reason, there is not a general blank liming recommendation for all soils in Ecuador. In the same way, phosphorus adsorption (fixation) reactions preferentially occur in soil of variable charge. This chapter extensively discusses the conditions that affected parent material that led to the development of permanent and variable charge soils in Ecuador, along with the strategies to manage acidity, salinity, and phosphorus in the different soils of the country.

8.1. Evolución de la infraestructura y la investigación en fertilidad de suelos en Ecuador

Ecuador tenía poca información para soportar su desarrollo agrícola antes de la década de 1940. Después de varias acciones conjuntas entre el gobierno Nacional y el gobierno de los Estados Unidos para establecer un sistema de generación de información científica, en agosto de 1942, los dos gobiernos firmaron un convenio de entendimiento que establecía el concepto de la Estación Experimental Agrícola como herramienta para organizar la investigación que serviría de soporte para el desarrollo de las potencialidades agrícolas del país (Cuvi, 2009).

De esta manera, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y la Corporación Ecuatoriana de Fomento crean, en enero de 1943, la Estación Experimental Agrícola de Ecuador con varios Centros Experimentales en distintos lugares de la Costa y la Sierra del país. Por su trayectoria en el tiempo, el más importante fue el Centro Experimental ubicado en la Hacienda “Pichilingue” en la provincia de Los Ríos (Amores, 1993; Cuvi, 2009). Luego de varios cambios, en 1949, la Estación Experimental Agrícola de Ecuador tenía una oficina central y un laboratorio en Quito y seis sitios donde se concentraron sus actividades: Pichilingue que investigaba en cacao, caucho, fibras, frutas y vegetales; Batán cerca de Quito en cereales y hortalizas; Tumbaco, Pichincha en maíz, hortalizas y frutas subtropicales; Tambillo, Pichincha en piretro, cereales, maíz y cultivos de altura; Conocoto, Pichincha con cereales, maíz, papas, pastos; y Saloya, noroccidente de Pichincha con quina y productos forestales (Cuvi, 2009).

Dentro del primer grupo de científicos que vinieron a trabajar en la Estación Experimental Agrícola de Ecuador se encontraba Eilif Miller, quien en 1945 condujo su trabajo de investigación para optar por su doctorado de la Universidad de Cornell. Esta investigación consistía en evaluar las características y propiedades de los suelos del Ecuador. Miller sostenía que la producción de alimentos y fibras se basaba en conocimiento de la capacidad de los suelos para sostener un nivel adecuado de producción y recomendó construir infraestructura para conducir análisis de suelos que sirvan de apoyo para el levantamiento de información básica para clasificación taxonómica y para manejo de la fertilidad del suelo. Estas propuestas abrieron las primeras puertas para enrumbar y orientar los trabajos en estas áreas que posteriormente se realizaron en el país. Miller presentó su trabajo en el artículo titulado “Agricultural Ecuador” publicado por la revista *Geographical Review* (Miller, 1959).

Por su parte, el laboratorio de la Estación Experimental Agrícola de Ecuador que se encontraba en Quito pasó a la jurisdicción del Ministerio de Agricultura y prestó sus servicios de análisis de suelos a los productores hasta que el Proyecto Nacional de Regionalización (PRONAREG) lo revitalizó y promovió su cambio a la granja de Ministerio de Agricultura en Tumbaco, cerca de Quito, para utilizar sus servicios en análisis de suelos para clasificación. En este sitio también estuvieron ubicados, junto con el laboratorio de suelos, los laboratorios de sanidad vegetal del Ministerio de Agricultura. El laboratorio de suelos continuó prestando servicios como parte integral de las actividades de diagnóstico que se llevaba a cabo en los laboratorios de Tumbaco. En el año 2002 se crea el Servicio Ecuatoriano de Sanidad Agropecuaria (SESA) con base en el complejo de laboratorios de Tumbaco y en el año 2008 se crea la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD) (Guanucha, 2019) con cambios en la estructura administrativa y un apreciable mejoramiento de la infraestructura y equipos de laboratorio. El laboratorio de suelos continua hasta el presente analizando muestras para clasificación y fertilidad.

En 1952, la Estación Experimental Tropical “Pichilingue” pasa a manos del Servicio Cooperativo Interamericano de Agricultura (SCIA) como parte del nuevo convenio de ayuda técnica entre el gobierno Nacional y el de los Estados Unidos (Robles, 2011). En 1960 se crea el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) mediante Ley de Emergencia y cuando inicia sus actividades en enero de 1962 la Estación Pichilingue se incorpora oficialmente al nuevo Instituto, al igual que la Estación Experimental Santa Catalina, cerca de Quito, que estuvo a cargo de la Comisión Nacional del Trigo, institución que también fue creada por el SCIA para la investigación en cereales de altura (INIAP, 1963; Naranjo y Tufiño, 1979; Barnes, *et al.*, 2017; Chamorro, 2021). INIAP a su vez crea varias nuevas Estaciones Experimentales

en Portoviejo, Santo Domingo y Boliche. En todas estas Estaciones experimentales se crearon los Departamentos de Suelos que fueron liderados por los ingenieros José Laínez (Pichilingue), Washington Bejarano (Santa Catalina), José Arroyabe (Portoviejo), Vicente Noboa (Santo Domingo) y Saúl Mestanza (Boliche), quienes fueron maestros y formadores de investigadores en área de la fertilidad del suelo y nutrición de cultivos.

En el año 1954, la entonces Facultad de Ingeniería Agronómica y Medicina Veterinaria de la Universidad Central del Ecuador (UCE) funda el Laboratorio de Química Agrícola y Suelos y encarga su dirección al Dr. Julio Peñaherrera. El Laboratorio se creó bajo el auspicio del convenio internacional de la UCE con la Universidad de Idaho y se ubicó en la Vieja Casona Universitaria en el centro de la ciudad de Quito, actual Biblioteca Municipal. Fue el primer Laboratorio de Suelos con fines agrícolas en una universidad del país. Además, este laboratorio condujo, entre 1955 y 1960, los análisis necesarios para completar el primer inventario de suelos llevado a cabo por los Drs. Erwin Frei y Alfredo Küpper con respaldo de la FAO (Acosta Solís, 1965; Ortiz, *et al.*, 2010). En 1960, el laboratorio se trasladó a las nuevas instalaciones de la Facultad en la Ciudadela Universitaria donde actualmente funciona como laboratorio docente de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UCE y como laboratorio que presta servicios de análisis de suelos a investigadores y agricultores.

A mediados de la década de los años 60 la Fundación Rockefeller dona al INIAP equipos para realizar análisis foliares, los mismos que se instalan en el Departamento de Suelos de la Estación Experimental Tropical Pichilingue. El Ing. José Laínez fue el técnico encargado de este laboratorio y por primera vez se comienza a brindar los servicios de análisis de tejidos vegetales a productores e investigadores de la región.

En junio 1964, por iniciativa de un grupo de empresarios ecuatorianos, se crea FERTISA como una compañía de economía mixta, cuyas instalaciones se ubicaron en la Avenida 25 de Julio, conocida como vía al Puerto marítimo de la ciudad de Guayaquil. Esta compañía se inició con la participación de los Ministerios de Agricultura y Finanzas, Banco de Fomento, Corporación Financiera Nacional, Sociedad Agrícola Industrial San Carlos y Compañía Azucarera Valdez S.A. Esta empresa instala una planta de ácido sulfúrico y otra de ácido fosfórico que utilizaba roca fosfórica importada y azufre proveniente de las minas de Tixán como materia prima para la elaboración de fertilizantes fosfatados que serían la base para la elaboración de los primeros fertilizantes compuestos en el país. FERTISA puso también al servicio de los agricultores el primer laboratorio de suelos privado del país. Entre los equipos del laboratorio estaba un moderno espectrofotómetro de absorción atómica, que en esos tiempos era una de las últimas tecnologías disponibles para determinar el estado de la fertilidad de los suelos. Basándose en los reportes del laboratorio, una dirección técnica contratada generaba las recomendaciones de fertilización para los agricultores. En 1982 FERTISA cerró las plantas mencionadas y en enero de 1994 fue privatizada y adquirida por la compañía Rey Banano del Pacífico del Grupo Wong.

El Dr. Frederick Hardy del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la FAO se encargó de realizar un estudio completo sobre suelos y ecología de la región cacaotera del país. El reporte del estudio describe las propiedades de los suelos de la región y los relaciona con los diferentes factores de formación y condiciones climáticas donde se produce cacao en el Ecuador (OEA, 1964). Esta información sirvió por mucho tiempo como una herramienta de trabajo a muchos investigadores y productores de este cultivo.

El 22 de noviembre de 1969 se crea la “Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo” (SECS) en el Club de Empleados del Ingenio San Carlos, parroquia Marcelino Maridueña, Cantón Yaguachi, Provincia del Guayas y se nombra al Ing. César Herrera Vásconez como primer presidente. Sus estatutos se legalizaron mediante acuerdo No. 3487 de 5 de febrero de 1970 del Ministerio de Previsión Social y Trabajo. El objetivo de la Sociedad fue el de agrupar a todos los técnicos especialistas en suelos y promover en todos los aspectos el desarrollo de la ciencia del suelo en sus aplicaciones agronómicas y ambientales a través de la organización de congresos, conferencias y otros eventos científicos que promuevan el mejoramiento técnico-científico de sus miembros. Desde ese entonces la SECS ha concentrado su trabajo en la organización de 16 Congresos Nacionales en diferentes ciudades del país y del XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo en Quito en 2016.

En el VII Congreso de la SECS realizado en octubre del año 2000 en la ciudad de Quito se crea la Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador (RELASE) para contribuir al mejoramiento de la calidad de análisis de suelos. La Dra. Gloria Carrera y la Ing. Edil Mendoza fueron quienes coordinaron inicialmente las actividades de la Red. Las actividades de la RELASE buscan estandarizar los procedimientos de análisis de suelos de los laboratorios miembros de modo que los reportes sean confiables y comparables. Esto asegura que los usuarios de los laboratorios reciban información oportuna, veraz y de calidad. Asimismo, la RELASE persigue el perfeccionamiento continuo de los 21 laboratorios de naturaleza pública y privada del país que integran esta Red (SECS, 2016). Se considera que, por sus funciones, el laboratorio de suelos de AGROCALIDAD pasaría a ser el laboratorio de control y referencia del país y que la RELASE debería ser coordinada por esta institución.

El Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Fertilidad del Suelo (ISFEI, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Carolina del Norte, USA, inició, a fines de la década de 1960, trabajo cooperativo con INIAP en Ecuador y con otros países en Latinoamérica para generar tecnología que permita diagnosticar la fertilidad de los suelos agrícolas como herramienta para planificar el uso eficiente de insumos para la nutrición de los cultivos (ISFEI, 1972; ISFEI and North Carolina State University, 1974). El programa incluyó la capacitación en manejo de la fertilidad del suelo de personal técnico de INIAP en Universidades de los Estados Unidos. Uno de los puntales del proyecto ISFEI fue la implementación de laboratorios de suelos que sirvan de apoyo para el diagnóstico de la fertilidad de los suelos. Gracias a esta iniciativa se construyeron los laboratorios del INIAP que en 1973 comenzaron a prestar servicios de análisis de suelos, tejidos vegetales y aguas en las estaciones experimentales de Santa Catalina (con la dirección del Dr. Washington Padilla e Ing. Jorge Cáceres) y Boliche (con la dirección del Ing. José Láinez) (INIAP, 1963; Naranjo y Tufiño, 1979). Con estos laboratorios se daba atención a los agricultores de la Sierra y Costa. El Dr. Sam Portch, representante del ISFEI en Ecuador, desempeñó un rol protagónico en el cumplimiento de las actividades descritas anteriormente.

Veinte años después, en 1992, se crea el laboratorio de Suelos en la Estación Experimental Tropical Pichilingue para dar cobertura a la región Central de la Cuenca del Río Guayas. Posteriormente, en los años 2007 y 2010, INIAP instala un laboratorio en la Estación Experimental del Austro en Azuay y otro en la Estación Experimental Central de la Amazonía en el Napo para complementar la cobertura en áreas de reciente expansión agrícola. Los Laboratorios de Suelos, Tejidos Vegetales y Aguas del INIAP vienen prestando servicio a la comunidad agrícola de todo el país desde hace 49 años con un incremento constante en el flujo de muestras.

Es importante destacar la construcción de la Presa Daule-Peripa entre 1982 y 1988, gran obra de infraestructura que permitió el trasvase de río Daule a la represa de Chongón para posibilitar el desarrollo de la agricultura de la Península de Santa Elena. El agua de ese reservorio provee agua a la represa del Azúcar y a la de San Vicente, así como a la del embalse de cola del canal Chongón-Playas. Estas obras y sus complementos estuvieron a cargo de la Comisión de Estudios para el Desarrollo de la Cuenca del Guayas (CEDEGE), institución que crea un laboratorio de suelos para apoyar la caracterización de los suelos de toda el área de influencia de sus proyectos de desarrollo. Este laboratorio estuvo localizado en la ciudad de Guayaquil y cesó sus actividades en el año 2008.

Cabe señalar también la importante contribución al conocimiento de la fertilidad de los suelos y nutrición de los cultivos de los laboratorios privados en el país. Entre ellos se destacan NEMALAB, creado en 1992 en El Cambio, Machala, Provincia de El Oro y la Clínica Agrícola, creada en 1994 en la ciudad de Quito. En septiembre de 1997, los tres ingenios azucareros más grandes del país, San Carlos, Valdez y La Troncal forman el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador (CINCAE) añadiendo a la estructura del Centro un departamento de suelos con su respectivo laboratorio que presta servicios a los agricultores de la región. De igual manera, y con objetivos similares, se crea en la ciudad de Guayaquil AGRORUM en el 2011 y AGROANALISIS en la ciudad de Durán en el 2014.

Finalmente, es importante destacar la inmensa contribución a través de los años de las Facultades de Agronomía de las Universidades del país por medio de las cátedras de Edafología, Fertilidad de Suelos, Manejo y Conservación de Suelos y Nutrición Mineral de Plantas, que motivaron a cientos de estudiantes a trabajar en sus tesis de grado en estas áreas, investigación que ha servido para mejorar la agricultura del país. Varias de estas universidades implementaron laboratorios de análisis de suelos que prestan servicios a la academia y a los agricultores.

8.2. Características que definen el manejo de los suelos de Ecuador

La visión de los suelos tropicales propuesta por Uehara and Gillman (1981) es la que quizá se ajusta mejor para describir los suelos tropicales y particularmente los suelos de Ecuador. Estos autores indican que el término suelo tropical es usado comúnmente para identificar cualquier suelo de los trópicos, sin embargo, como cualquiera de los nombres comunes, el término suelo tropical carece de precisión, pero es fácilmente entendido por el gran público que cuando se usan los nombres definidos por la taxonomía de suelos. Por esta razón, el término suelo tropical se usa como sinónimo de suelos rojos muy meteorizados, ácidos e infértiles. Es verdad que los suelos con estas características están localizados en los trópicos, pero no todos los suelos de los trópicos, y en particular los de Ecuador, tienen estas características.

En Ecuador existen suelos de diferentes orígenes que deben manejarse también en forma diferente. La mayoría de sus propiedades están controladas por la relación química entre los coloides del suelo [minerales (arcillas) y orgánicos (humus)] y la solución del suelo. Por esta razón, es indispensable en primer lugar conocer la mineralogía de las arcillas para luego determinar cómo ésta influye en el manejo del suelo. Si la mineralogía de las arcillas influencia directamente el comportamiento de los suelos no debe extrañar que la clasificación taxonómica tenga una relación estrecha con la mineralogía. Por esta razón, es importante relacionar la mineralogía y la clasificación con la química y la fertilidad del suelo para definir formas adecuadas de manejo. A continuación, se discuten estas relaciones y se sugieren prácticas de manejo del suelo para las condiciones particulares de Ecuador.

8.3. Descripción general de las arcillas

Antes de iniciar con la discusión sobre el comportamiento de los suelos de Ecuador es necesario hacer una breve descripción de la estructura básica de las arcillas para entender su aporte a la dinámica del suelo. Los coloides minerales del suelo (arcillas) son minerales secundarios que provienen de la alteración de las rocas y minerales primarios resultantes de la solidificación del magma que luego de largos procesos geológicos de modificación se transformaron en partículas definidas de tamaño menor a 0.002 mm. El rearrreglo de los componentes químicos de los minerales primarios y el cambio de tamaño de los materiales resultantes da lugar a las arcillas con características particulares que controlan la dinámica del suelo (Brady and Weil, 2008).

8.3.1. Arcillas cristalinas

El agua, la temperatura, las condiciones de oxi-reducción, la actividad biológica y el tiempo disolvieron los minerales primarios y los materiales disueltos se reprecipitaron formando las arcillas. Los filosilicatos son las arcillas más generalizadas en los suelos del mundo. Este tipo de arcillas está compuesto por láminas de estructura básica que se mantienen unidas por enlaces químicos. Una lámina está constituida por cristales de tetraedros de sílice (Si) con fórmula Si_2O_5 y la otra lámina está formada por octaedros de aluminio (Al) con fórmula $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ (**Figura 8.1**). La combinación de estas láminas dio lugar a la formación de los cristales de arcilla con estructuras definidas denominadas alumino-silicatos que se pueden identificar claramente por el pico que desarrollan cuando se hace un barrido con rayos X en una muestra del material estudiado. Cada una de estas arcillas tiene un comportamiento particular desde el punto de vista físico-químico (Nanzyo and Kanno, 2018).

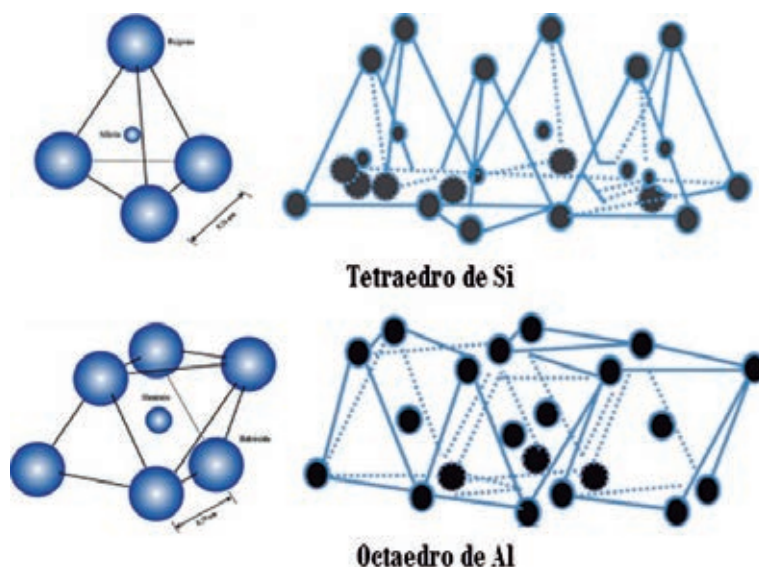


Figura 8.1. Estructuras básicas de los aluminosilicatos (arcillas laminares). Adaptado de Kodama (2012) y Nanzzy and Kanno (2018).

Las primeras arcillas laminares que aparecieron por el efecto de los factores de intemperización fueron las arcillas de tipo 2:2 o 2:1:1 que son apilamientos de las láminas básicas de Si y Al. Un ejemplo de este tipo de arcillas es la clorita. A medida que avanza la intemperización aparecen las arcillas de tipo 2:1 que son aluminosilicatos conformados por dos láminas de Si que tienen en el medio una lámina de Al. Las arcillas de tipo 2:1 (esmectitas) más comunes en el suelo son la montmorillonita y la vermiculita. Con el paso del tiempo o por la intensificación de la intemperización las arcillas de tipo 2:1 pierden una capa de Si (desilificación) dando lugar a las arcillas de tipo 1:1, es decir, arcillas que tienen una lámina de Si y una lámina de Al como la caolinita y la halloisita. Finalmente, los agentes de meteorización alteraron de las arcillas cristalinas promoviendo la desilificación total de los materiales formando coloides minerales denominados sesquióxidos de Al y hierro (Fe). Estos óxidos e hidróxidos inicialmente son compuestos amorfos (geles), pero con el tiempo se cristalizan por efecto de los procesos redox y la temperatura. Los cristales formados tienen diferente grado de hidratación. Las arcillas de este tipo más comunes son la gibsita, la bohemita (Al) y la goetita y hematita (Fe) (Nanzzy and Kanno, 2018). Una descripción de la estructura de las arcillas y del proceso de desilificación se presenta en la **Figura 8.2**.

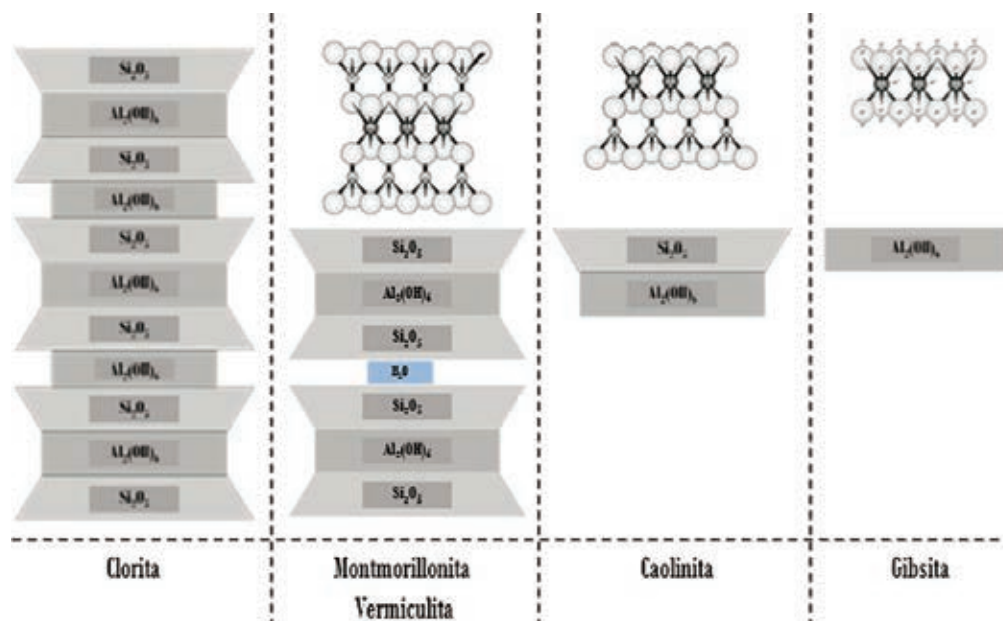


Figura 8.2. Tipos de arcillas cristalinas que demuestran el proceso de desilificación. Adaptado de Nanzzy and Kanno (2018)

8.3.2. Arcillas no cristalinas derivadas de material volcánico

Una de las características particulares de los suelos derivados de cenizas volcánicas es la presencia de minerales arcillosos no cristalinos o amorfos. Estas arcillas no pueden calificarse como cristalinas porque no tienen una composición química fija y orden en su arreglo atómico. Cuando estas arcillas se exponen a un barrido por rayos X no muestran un pico definido como lo hacen los cristales de las arcillas de tipo 2:1 y 1:1. La formación de arcillas no cristalinas es el resultado de la rápida meteorización de los vidrios volcánicos contenidos en las cenizas (tepra o material piroclástico) que liberan elementos en forma más rápida que la formación de arcillas cristalinas, favoreciendo así la formación de arcillas no cristalinas. Las principales arcillas de este tipo son alofana, imogolita y complejos humus-Al (Harsh, 2012; Nanzyo and Kanno, 2018).

La alofana es una arcilla aluminio silicatada que consiste en una esfera irregular vacía en el centro con un diámetro exterior de 3.5 a 5 nm. Por otro lado, la imogolita consiste en una estructura tubular alargada como un pelo que puede tener varias micras de longitud. La superficie externa del tubo está compuesta de una estructura curva de gibsita y ortosilicatos (Harsh, 2012). Las estructuras de la alofana y la imogolita se presentan en la **Figura 8.3**. Finalmente, los complejos humus-Al se forman por el acomplejamiento del Al por el humus presente en el perfil lo cual permite que el humus se acumule y establezca en el suelo (Takahashi, *et al.*, 2010; Takahashi and Dahlgren, 2016). Este tipo de arcillas tienen características muy particulares que hacen que el comportamiento de los suelos derivados de cenizas volcánicas sea diferente de otros suelos desde el punto de vista físico, químico y biológico.

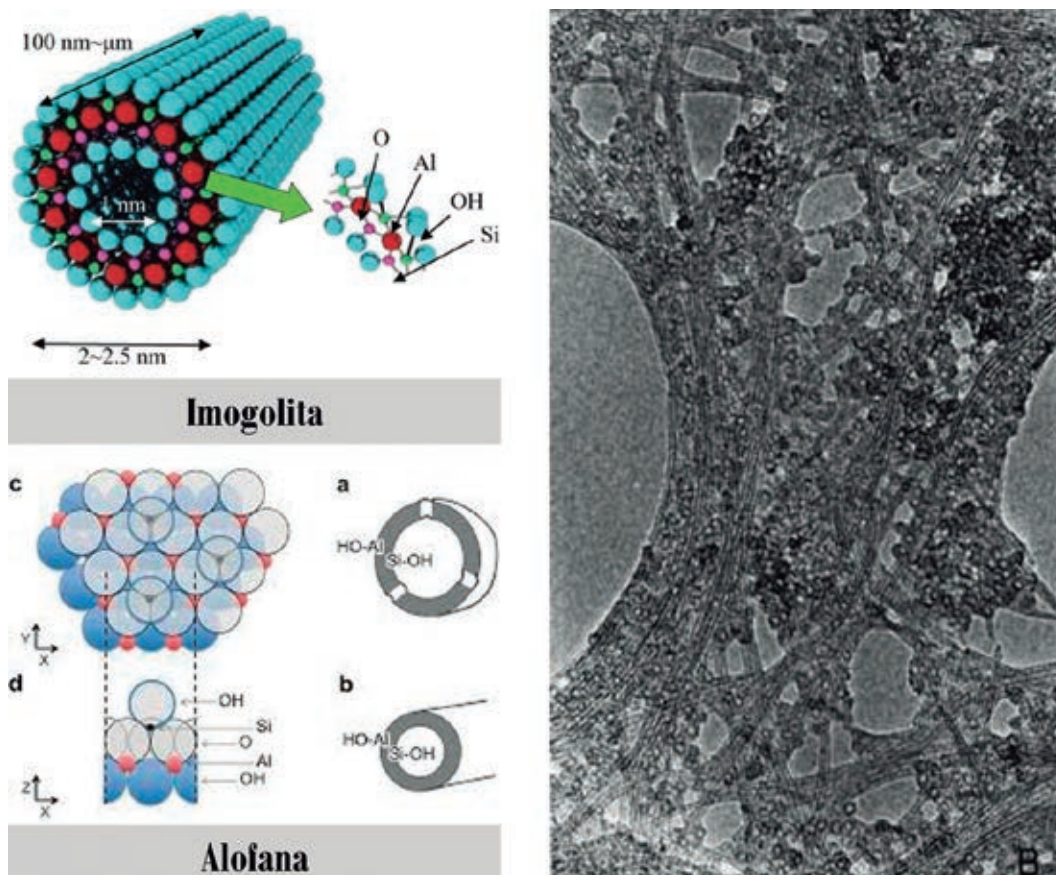


Figura 8.3. Estructuras de la alofana y la imogolita (izquierda) (Nanzyo and Kanno, 2018), Fotografía de la alofana (grumos) e imogolita (filamentos) vistas por microscopio electrónico (derecha) (Shoji, *et al.*, 1993).

8.4. Origen de la carga eléctrica de las arcillas

La superficie de los materiales coloidales, sean minerales u orgánicos, se encuentran cargados eléctricamente o, en otras palabras, la superficie tiene un exceso o déficit de electrones. Los minerales arcillosos discutidos en la sección anterior se dividen en dos grupos con respecto al origen de su carga superficial: 1) arcillas de carga permanente y 2) arcillas de carga variable.

Esta separación no es rígida porque por un lado un mismo coloide puede tener los dos tipos de carga (caolinita) y por otro los coloides son una mezcla íntima de varios minerales. Es difícil encontrar un suelo que tenga un solo tipo de coloide, pero, en general, los suelos están dominados por cierto tipo de coloides, es decir, tienen un porcentaje más alto de un tipo de arcillas que son las que imparten las características de comportamiento a un determinado suelo.

8.4.1. Arcillas de carga permanente

Una arcilla cristalina perfectamente formada no posee exceso de carga en la superficie porque todos los átomos en el cristal están perfectamente balanceados. Con el tiempo se desarrollan imperfecciones en la estructura de las láminas que producen un exceso de carga positiva o negativa que debe ser compensada por iones de carga opuesta. Esta imperfección puede ser, por ejemplo, la sustitución de un átomo de Si tetravalente (Si^{+4}) por un átomo de Al trivalente (Al^{+3}) en el tetraedro de la lámina de Si, o la sustitución de Fe y Mg divalentes (Fe^{+2} , Mg^{+2}) por Al en el octaedro de la lámina de Al. Este proceso es conocido como sustitución isomórfica y provoca un exceso de carga negativa permanente en la superficie de las arcillas formadas por cristales definidos (Bleam, 1990). Un esquema de este proceso se presenta en la **Figura 8.4**.

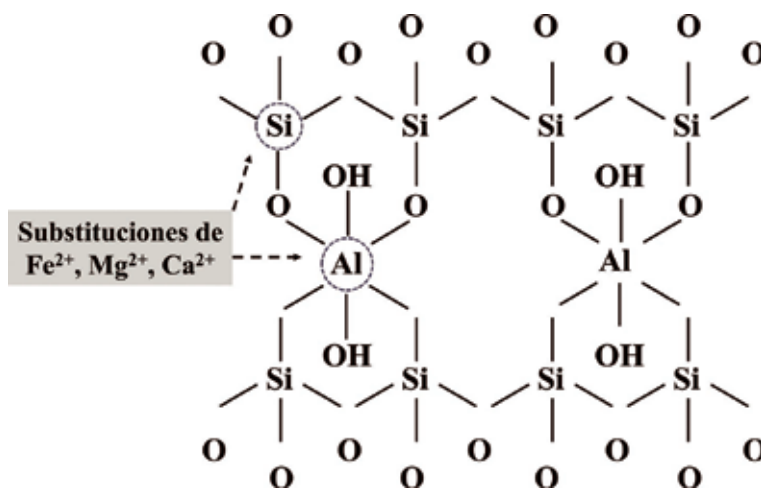


Figura 8.4. Sustitución isomórfica en la montmorillonita que produce carga eléctrica negativa permanente. Adaptado de Borchardt (1982) y Kodama (2012).

Las esmectitas, representadas por la montmorillonita y la vermiculita, son un típico ejemplo de los minerales arcillosos de carga permanente. La carga eléctrica de la montmorillonita proviene de la sustitución isomórfica de un ion de valencia más baja en la posición ocupada normalmente por un ion de valencia más alta. Debido a que la sustitución ocurre en el interior del cristal, el defecto genera carga eléctrica permanente en la superficie y ésta no se altera por factores externos como pH de la solución del suelo (Borchardt, 1982).

En la mayoría de los minerales de carga permanente la carga eléctrica superficial es negativa y es contrabalanceada con cationes presentes en la solución del suelo. Estos cationes son una importante fuente de nutrientes para las plantas y esta capacidad de retener y suplir cationes es usada como un índice de la capacidad productiva del suelo. Las arcillas de carga permanente son comunes en las regiones templadas

del mundo, pero también aparecen en los trópicos en circunstancias particulares (Uehara and Gillman, 1981). La carga eléctrica de la superficie de las arcillas de los suelos dominados por minerales de carga permanente no puede ser cambiada por el manejo del suelo.

La montmorillonita tiene características particulares que merecen discutirse. Su estructura de tipo 2:1 está constituida por una lámina octaédrica de Al ubicada entre dos láminas de tetraedros de Si. Entre partículas individuales de montmorillonita quedan láminas de Si ubicadas una a continuación de otra sin que tengan ningún tipo de enlace entre sí. Este espacio es ocupado por moléculas de agua, lo que provoca que las arcillas se hidraten y expandan en forma reversible. Estas arcillas expandibles tienen alta cohesión, plasticidad y pegajosidad. Por esta razón, los suelos ricos en montmorillonita son difíciles de manejar ya que al secarse se contraen y agrietan; y son impermeables cuando están húmedos (Borchardt, 1982).

La mecanización de estos suelos es una práctica difícil ya que puede hacerse solamente dentro de ciertos límites de contenido de humedad. Las épocas secas o lluviosas del año juegan un rol determinante en el manejo de este tipo de arcillas. La contracción de las arcillas en la estación seca produce agrietamientos que provocan la ruptura y secamiento de las raíces, mientras que la expansión durante la estación lluviosa favorece que se presenten condiciones de reducción. Además, suelos ricos en montmorillonitas resultan inestables como material de soporte en obras de ingeniería. Las cercas en el campo se tuercen, los muros y paredes se inclinan y los pisos se cuartejan y levantan.

La vermiculita es otro tipo de arcilla del grupo de las esmectitas que se caracterizan por tener carga eléctrica permanente. A diferencia de la montmorillonita es solamente capaz de hidratarse parcialmente y, por esta razón, no es muy pegajosa y plástica. Los suelos ricos en esta arcilla no presentan menos problemas de manejo. Estas características le confieren las mismas propiedades químicas y de fertilidad de la montmorillonita, pero con más alto potencial de fertilidad y más agresividad en el intercambio de iones (Borchardt, 1982).

8.4.2. Arcillas de carga variable

En los suelos altamente meteorizados de los trópicos, las arcillas de carga permanente han sido severa o completamente alteradas dando lugar a la formación de otros minerales arcillosos con diferentes propiedades. Un cambio fundamental ocurre en la carga eléctrica de la superficie de estas arcillas. En este caso, la carga eléctrica es creada por la protonación o deprotonación de los grupos funcionales presentes en la superficie de las arcillas, y la carga neta está determinada por el ion que es adsorbido en exceso. Los procesos de creación de carga requieren de la presencia de estos iones, denominados iones determinantes, en la solución del suelo en cantidades suficientes para que ocurra el proceso (Harsh, 2012).

Se puede utilizar la hematita (óxido de hierro) como ejemplo para ilustrar la variabilidad de la carga superficial de las arcillas. Esta arcilla cuando está en contacto con la solución del suelo tiene una superficie hidroxilada (presencia de OH terminales) que es capaz de protonarse o deprotonarse en función de la actividad (concentración) de iones H^+ en la solución del suelo, es decir del pH. Un medio ácido permite la protonación, mientras que un medio alcalino favorece la deprotonación, como se demuestra en la **Figura 8.5** (Uehara, 1978). La adsorción neta determina el potencial eléctrico de la superficie de la arcilla. El H^+ y OH^- son los iones determinantes.

En el pasado, estos minerales se conocían como arcillas dependientes del pH porque la carga eléctrica está gobernada en gran parte por el pH de la solución, pero se ha demostrado que la carga neta también está influenciada por otras condiciones como la valencia y la concentración de los iones en la solución, la temperatura y la constante dieléctrica del medio. Por esta razón estos minerales se conocen ahora como arcillas de carga variable (Zhang and Zhao, 1997; Van Ranst, *et al.*, 2017). A diferencia de los que ocurre con las arcillas de carga permanente, en las arcillas de carga variable las prácticas de manejo agrícola pueden cambiar la carga y crear condiciones diferentes como se discutirá más adelante.

En adición a los coloides orgánicos, dentro de las arcillas de carga variable se encuentran los óxidos e hidróxidos de Fe y Al, las arcillas presentes en los suelos derivados de cenizas volcánicas (alofana, imogolita y complejos humus-Al) y la caolinita en cuyos bordes se desarrolla también carga variable.

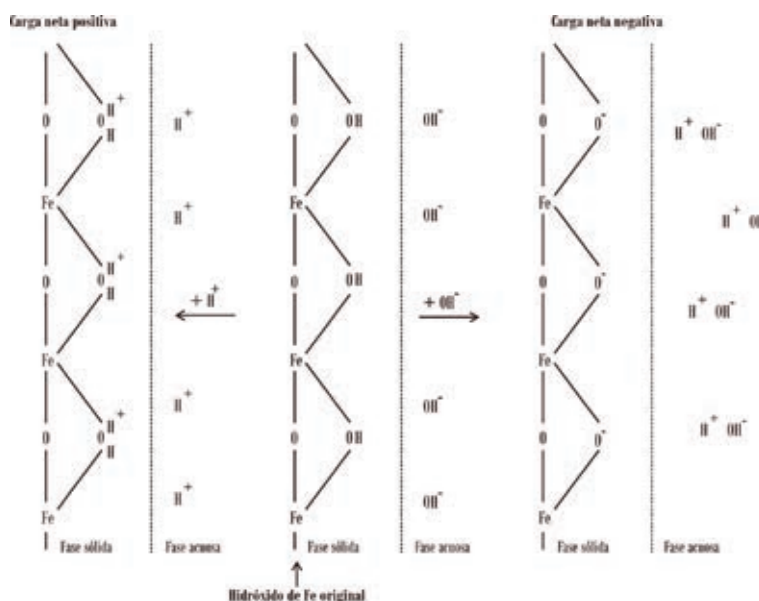


Figura 8.5. Origen de la carga en las arcillas de los suelos de carga variable (Uehara, 1978).

El comportamiento de los suelos depende en buena parte de su mineralogía. En aquellas localidades donde la mineralogía de la fracción arcillosa no varía mucho, se pueden hacer generalizaciones del comportamiento del suelo basándose solamente en la textura. En suelos agrícolas, la física, la química y la fertilidad y, en consecuencia, el manejo se altera substancialmente con la mineralogía. Como se ha indicado, los dos sistemas químico minerales encontrados en la fracción arcillosa de los suelos son las arcillas de carga permanente y las arcillas de carga variable.

El hecho de que la mineralogía juega un papel importante en la determinación de las características de un suelo se refleja en la fuerte relación que existe entre la mineralogía y los órdenes del suelo como se ilustra en la **Figura 8.6**, cuyas esquinas representan los miembros puros de los suelos que contienen altos contenidos de materia orgánica, óxidos, material no cristalino y materiales cristalinos (esmeritas). Los cuatro órdenes de la taxonomía que más estrechamente corresponden a estos materiales son los Histosoles, Oxisoles, Andisoles y Vertisoles, de acuerdo a la taxonomía del suelo (Soil Survey Staff, 2006). Tres de estos órdenes están dominados por minerales arcillosos de carga variable.

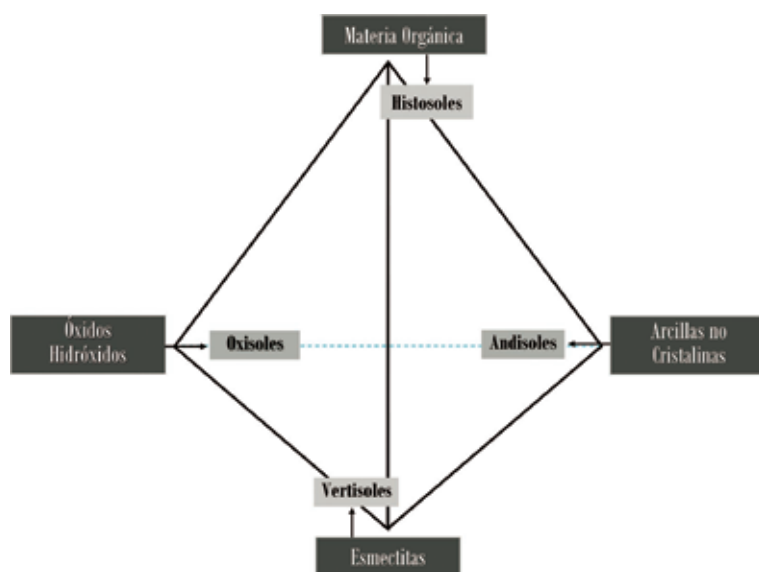


Figura 8.6. Relación entre los colides del suelo y la clasificación (Uehara and Gillman, 1981).

Si solamente se toman en cuenta los suelos inorgánicos, se pueden colocar cuatro órdenes más de suelos en posiciones dentro de un triángulo representando los suelos inorgánicos como se ilustra en la **Figura 8.7**. Los Ultisoles se localizan cerca de los Oxisoles, los Espodosoles cerca de los Andisoles y los Mollisoles cerca de los Vertisoles. Los Inceptisoles son suelos jóvenes que no se han desarrollado todavía lo suficiente, de modo que no es claro a qué lado pertenecen y por esta razón se los localiza en el centro.

Existen otros tres órdenes que no encajan en este criterio: Alfisoles, Aridisoles y Entisoles. Los Aridisoles no se insertan en el criterio porque son clasificados con base a aridez y los Entisoles porque no han desarrollado evidencia pedogenética de desarrollo. Sin embargo, el caso de los Alfisoles es diferente porque, debido a su composición mineralógica, en algunos casos se localizan cerca de los Oxisoles y en otros cerca de los Mollisoles y Vertisoles. Generalmente, los Alfisoles en los trópicos contienen arcillas de carga variable, como los Oxisoles, mientras que en las zonas templadas contienen arcillas de carga permanente.

Si se examinan los suelos en o cerca de la línea Ecuatorial se encuentran ejemplos de suelos altamente meteorizados en países como Brasil, Colombia, Ecuador, Venezuela y los países de América Central. Una notable excepción en esta región son los suelos jóvenes de los Andes y de las cadenas montañosas de América Central formados por deposiciones recientes de ceniza volcánica. Si bien estos suelos son relativamente más fértiles también tienen como principal característica que los minerales arcillosos, producto de la meteorización de la ceniza volcánica, son también minerales de carga variable.



Figura 8.7. Relación entre los constituyentes inorgánicos y los órdenes de los suelos (Uehara and Gillman, 1981).

8.5. Desarrollo de los suelos de Ecuador

El efecto de los factores de intemperización, particularmente la temperatura y el régimen de precipitaciones, envejecieron las arcillas en las zonas tropicales del mundo y eliminaron el Si dejando suelos dominados por caolinita y sequióxidos de Fe y Al. Por esta razón, los suelos de los trópicos son rojos, ácidos y de pobre fertilidad y, además, tienen carga variable. A medida que los suelos se alejan de la línea ecuatorial y se acercan a los límites entre el trópico y el subtropical aparecen con más frecuencia los suelos dominados por esmectitas caracterizados por tener carga permanente. En las zonas templadas del planeta los suelos están dominados por arcillas de tipo 2:1 y las zonas frías por arcillas tipo 2:2 o 2:1:1 como la clorita. En la **Figura 8.8** se presenta lo que teóricamente sería la distribución geográfica de los minerales arcillosos en el mundo de acuerdo con los efectos de la intemperización en las arcillas del suelo.

De acuerdo con el esquema de ubicación geográfica de los suelos por efecto de la intemperización de las arcillas, Ecuador debería tener solamente suelos rojos y ácidos como los suelos de los Llanos Orientales de Venezuela y Colombia o como los suelos predominantes en la selva Amazónica. Al contrario, en Ecuador existe una diversidad de suelos como consecuencia de la edad de formación y la presencia de diferentes materiales de origen que, en cierta medida, son independientes de las tres regiones naturales del territorio continental: Costa, Sierra y Oriente.

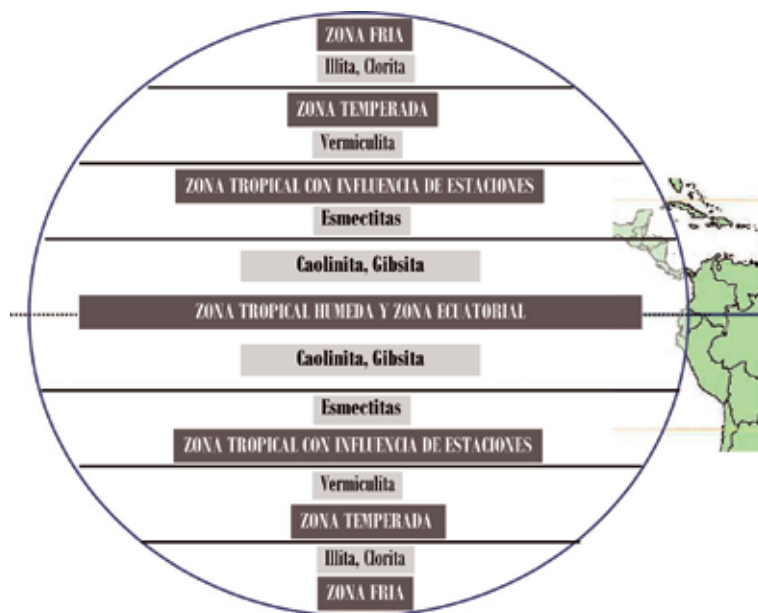


Figura 8.8. Distribución geográfica de los minerales arcillosos en el mundo de acuerdo con los efectos de la intemperización en las arcillas del suelo. Adaptado de Uehara and Gillman (1981).

La formación de los Andes en etapas geológicas pasadas modificó radicalmente el clima al controlar la entrada de las lluvias provenientes de lo que hoy es la Amazonía a la costa occidental de América del Sur. Por otro lado, el efecto de la corriente fría de Humboldt, que corre paralela a la costa desde Chile hasta la parte media de Ecuador antes de girar hacia las islas Galápagos, modificó definitivamente el régimen de lluvias y volvió secas las costas de las zonas de su influencia en América del Sur. El clima, que por su latitud debería corresponder a las zonas con régimen de lluvias tropical y subtropical, se caracterizó por la ausencia de lluvias.

En Ecuador, el levantamiento de los Andes y la corriente cálida del Niño y fría de Humboldt afectaron el régimen de lluvias de la zona sur del país generando zonas lluviosas en el Este y Noroeste, así como zonas secas en la Sierra Centro y Sur, así como zonas secas y áridas en toda la Costa (Pourrut, 1983; León, 2010). Sin embargo, hacia el interior y el noreste de la Costa las lluvias se incrementan gradualmente hasta llegar a precipitaciones anuales de > 3000 mm en el interior de la provincia de Esmeraldas y en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas (**Figura 8.9**).

Como consecuencia de los cambios en los factores de intemperización, particularmente la lluvia, las rocas primarias que geológicamente se formaron después del levantamiento de Los Andes (**Figura 8.11 a y b**) se transformaron en arcillas de tipo 2:1 (carga permanente) en las zonas secas del país, debido a que la ausencia de lluvias evitó la desilificación de los materiales arcillosos formados y no se llegó a generar caolinita y/o sequioxidos de Fe y Al en lo que hubiese sido el normal proceso de meteorización si las condiciones tropicales hubiesen prevalecido. Sin embargo, en la zona húmeda del noreste de la Costa el proceso de desilificación continuó y se desarrollaron suelos rojos y ácidos dominados por caolinita y sequioxidos de Fe y Al (carga variable). Por otro lado, en la Amazonía los agentes de meteorización permanecieron inalterados y los minerales primarios se meteorizaron y pasaron por un largo proceso de desilificación que terminó en la consolidación de suelos viejos, rojos y ácidos en casi toda esta región.

Por otro lado, la actividad volcánica de los últimos 5 000 años cubrió la Sierra Norte y sus áreas adyacentes en la Costa y la Amazonía con una gruesa capa de cenizas volcánicas sobre las rocas primarias que no pudieron meteorizarse (**Figura 8.10**). Esta situación dejó sobre la superficie un nuevo material para intemperización que dio lugar a los suelos derivados de cenizas volcánicas dominados por arcillas amorfas de carga variable (**Figura 8.11**) como la alofana, imogolita y complejos humus-Al (Nanzyo and Kanno, 2018).

La modificación del normal proceso de meteorización, principalmente por el cambio de la cantidad e intensidad de las lluvias, generó la posibilidad de que Ecuador, un país localizado sobre la línea ecuatorial, tenga una variedad de suelos que soporta una de las mayores expresiones de diversidad de vida sobre el planeta. Desde el punto de vista de producción agrícola, el manejo de los suelos de Ecuador está controlado por el tipo de arcilla presente, es decir por el tipo de carga eléctrica de los colides del suelo. Los principales efectos de la carga de las arcillas sobre el manejo de los suelos se describen a continuación.

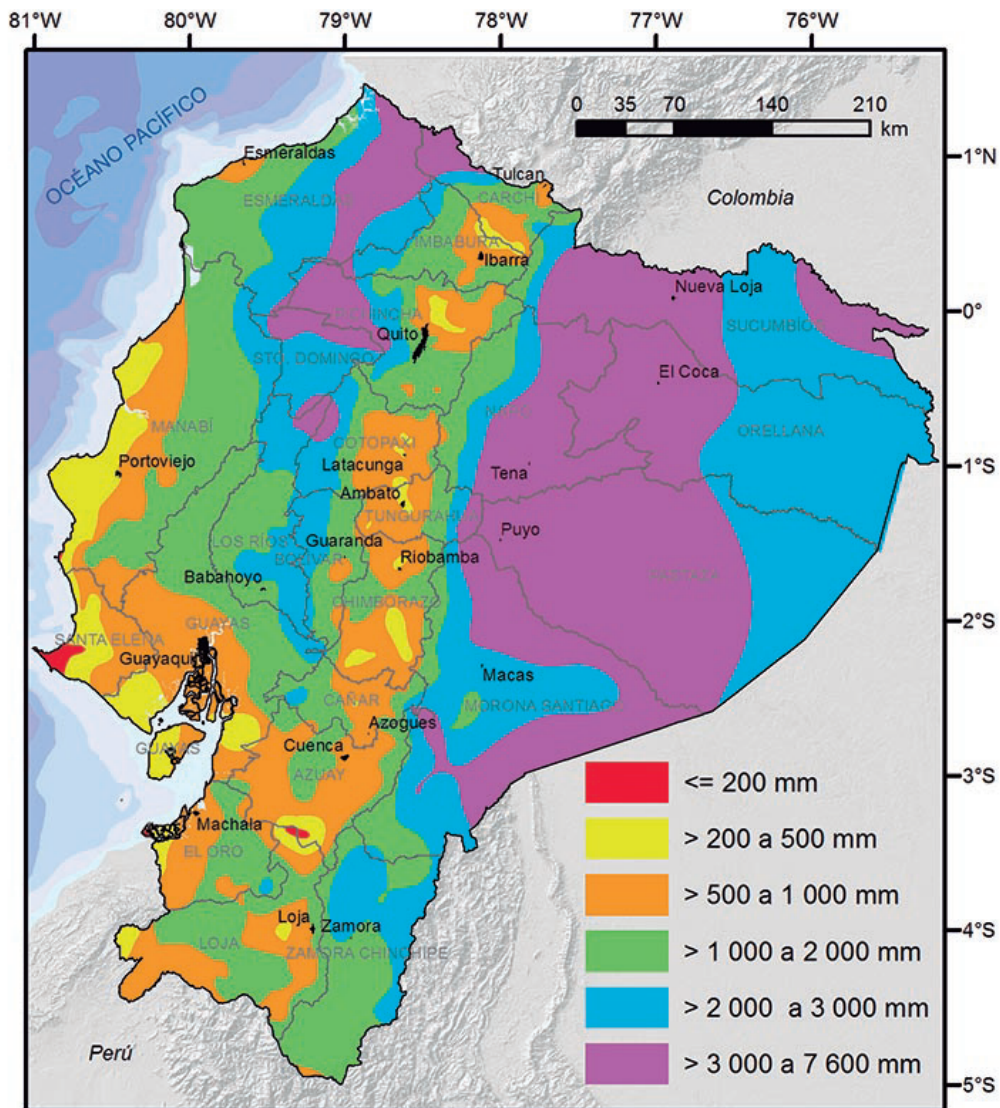


Figura 8.9. Pluviometría media anual en el Ecuador. Figura procesada a partir de la capa de Precipitación Anual 1: 50 000 del Geoportel del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2021).

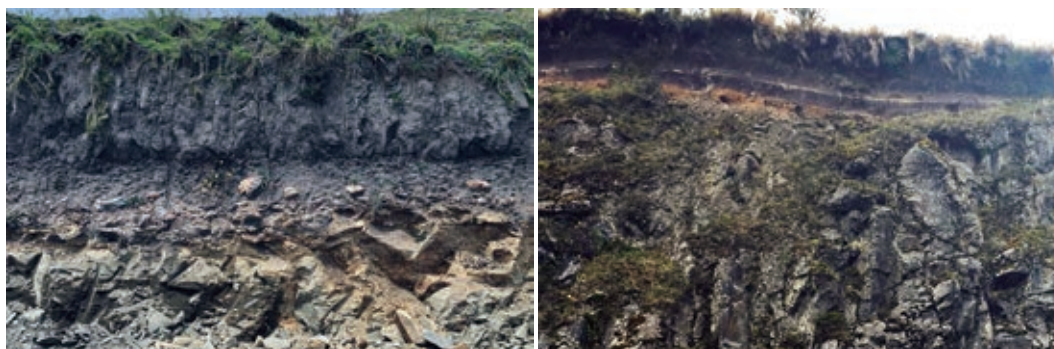


Figura 8.10. Discontinuidad litológica generada por la acumulación de ceniza volcánica sobre roca primaria. Cangahua, Cayambe, Pichincha (izquierda) y Papallacta, Quito, Pichincha (derecha).

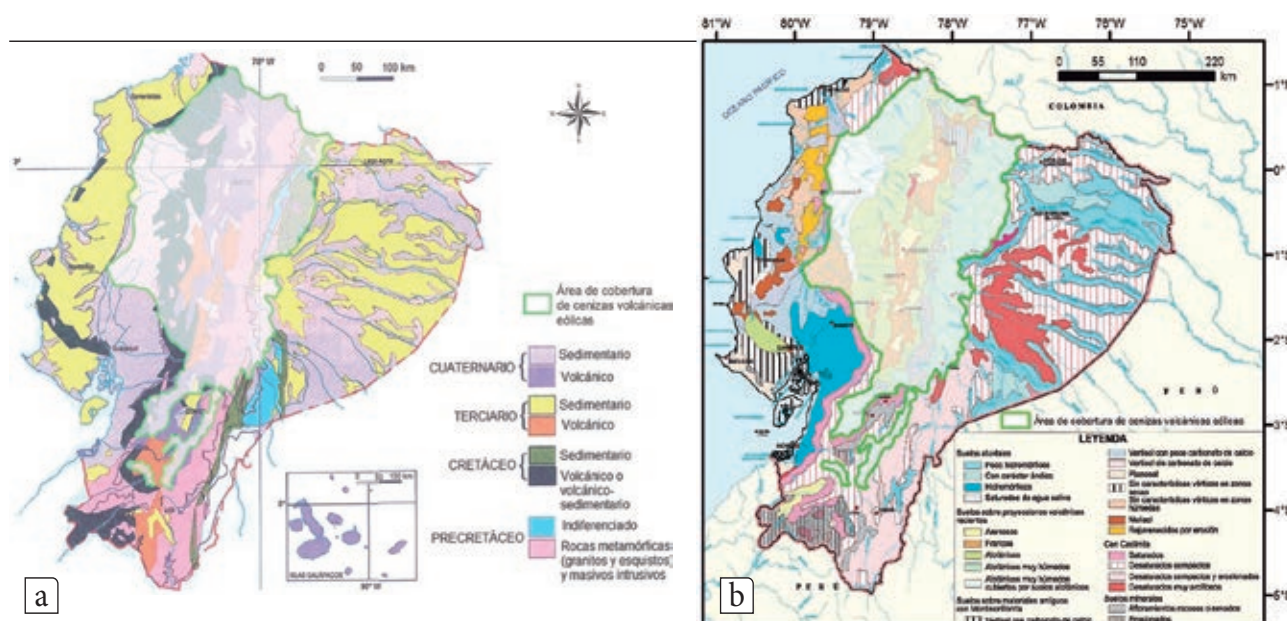


Figura 8.11. a) Distribución de las cenizas volcánicas eólicas (Winckell, 1982) sobre el mapa geológico del Ecuador (León, 2010) y b) sobre el mapa del Ecuador que agrupa suelos aluviales, montmorilloníticos, caoliniticos y alofánicos (IGM, 2013).

8.6. Acidez en los suelos de Ecuador

La producción de los cultivos se limita considerablemente cuando el suelo es ácido por naturaleza o se torna ácido por manejo. El control de la acidez del suelo es una práctica común en las regiones con suelos ácidos en el mundo, sin embargo, el modificar el pH para lograr condiciones adecuadas para los cultivos depende del tipo de carga de las arcillas presentes en el suelo y, por esta razón, no se puede hacer una recomendación general de encalado para todos los suelos. Esto es particularmente cierto en Ecuador donde existen áreas con suelos dominados por arcillas de carga permanente y arcillas de carga variable. A continuación, se discuten las bases para el adecuado control de la acidez en los suelos de Ecuador.

8.6.1. Conceptos sobre acidez

La acidez de una solución está determinada por la actividad de los iones hidrógeno (H^+) y se determina midiendo la actividad del H^+ en una solución y se expresa con un parámetro denominado potencial hidrógeno (pH). Los ácidos débiles se disocian poco y en las soluciones acuosas muy diluidas se presentan concentraciones muy bajas de iones H^+ , tan bajas que es difícil presentarlas numéricamente en términos de molaridad. Por esta razón se define el pH en forma logarítmica. En realidad, el pH se define como el inverso del logaritmo de la actividad de iones H^+ de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{pH} = \log \frac{1}{\text{H}^+}$$

Así, a pH 7.0, por ejemplo, la actividad (concentración) de iones H^+ es igual a 0.0000001 moles de H^+ por litro. El inverso de 0.0000001 es 10000000 y el logaritmo de este número es 7. La escala del pH cubre un rango que va de 0 a 14. Un valor de 7.0 es neutro (igual número de iones H^+ y OH^- en la solución) mientras que valores menores que 7.0 son ácidos y valores mayores que 7.0 son básicos. El significado práctico de la expresión logarítmica del pH radica en el hecho de que cada unidad de cambio de pH corresponde a un incremento de 10 veces en la cantidad de acidez o basicidad del suelo. En otras palabras, un suelo con pH 5.0 tiene 10 veces más H^+ activo que un suelo con pH 6.0 (Thomas and Hargrove, 1984; Zapata, 2004). La determinación de la acidez del suelo se logra midiendo el pH de una suspensión de una relación de 2:1 agua:suelo.

8.6.2. Origen de la acidez del suelo

Existen varios procesos que promueven la acidificación y reducen el pH del suelo. Todos estos procesos ocurren naturalmente dependiendo del tipo de suelo, del tipo de cultivo y de las condiciones de manejo. Un conocimiento adecuado de estos procesos en el suelo permite un mejor control de las situaciones que conducen a condiciones ácidas. Estos procesos se describen a continuación (Brady and Weil, 2008; Havlin, *et al.*, 2014):

8.6.2.1. Actividad radicular y remoción de nutrientes

Un suelo con pH neutro tiene saturada la fase de intercambio con cationes básicos (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+). Estos cationes satisfacen la carga eléctrica de la superficie de los coloides del suelo. La acidificación se inicia con la pérdida de estos cationes debido en parte a la acción de las raíces. La planta, al absorber cationes, libera H^+ para mantener el equilibrio en su interior, lo que contribuye a la reducción del pH del suelo. Adicionalmente, los exudados ricos en ácidos orgánicos y la respiración de las raíces y de los microorganismos que residen en la rizósfera contribuyen para la disminución del pH como resultado del aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera del suelo y la formación de ácido carbónico especialmente en suelos neutros o alcalinos (Lindsay, 1979; Petersen and Böttger, 1991; Gollany, *et al.*, 1993; Neumann and Römheld, 1999; Bidet, *et al.*, 2000; Jones, *et al.*, 2003). También, las raíces y los microorganismos asociados a los sistemas radiculares podrían alterar el pH del suelo en la rizósfera a través de reacciones de óxido reducción; puesto que la mayoría de reacciones químicas envueltas en el cambio del estado de oxidación del Fe, Mn y N también implican consumo o producción de H^+ ; por consiguiente, se evidencia una conexión importante entre el potencial redox y el pH de un suelo (van Breemen, 1987; Flessa and Fischer, 1992; Begg, *et al.*, 1994; Marschner and Römheld, 1994).

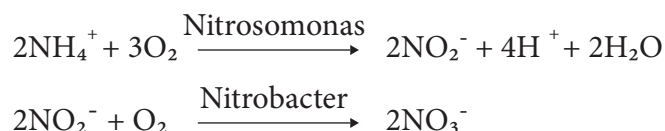
Por otro lado, el movimiento de cationes a capas inferiores (lixiviación) contribuye también a la acidificación del suelo. Este movimiento de cationes se debe a la presencia de aniones que formando pares iónicos se encargan de arrastrar los cationes del perfil del suelo con el movimiento del agua. En el inicio, el aporte de aniones a la solución del suelo se produce por medio de la mineralización de la materia orgánica que produce aniones como nitrato (NO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}) y cloruro (Cl^-) que son los que arrastran los cationes básicos del perfil al formar los respectivos pares iónicos. Además, la materia orgánica del suelo se descompone con la ayuda de microorganismos produciendo un constante suplemento de CO_2 que fácilmente se transforma en bicarbonato (HCO_3^-) de acuerdo con la siguiente reacción:



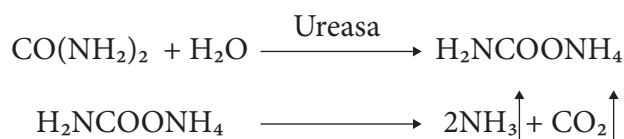
Esta reacción aporta H^+ , que reduce el pH, y bicarbonato (HCO_3^-) que se combina fácilmente con los cationes básicos lavándolos del perfil, promoviendo de esta forma condiciones favorables para acidez. La materia orgánica del suelo contiene también grupos funcionales como los carboxílicos y fenólicos activos que se disocian liberando iones H^+ a la solución del suelo. El contenido de materia orgánica varía de sitio a sitio y por lo tanto su contribución a la acidez del suelo es también variable.

8.6.2.2. Utilización de Fertilizantes Nitrogenados

Los fertilizantes nitrogenados que contienen o forman amonio (NH_4^+) incrementan la acidez del suelo a menos que la planta absorba NH_4^+ directamente. Ejemplos de estos fertilizantes son el sulfato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, nitrato de amonio (NH_4NO_3) y la urea $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$. El $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y el NH_4NO_3 aplicados al suelo se disocian liberando NH_4^+ . Esta forma de nitrógeno (N) se convierte en nitrato (NO_3^-) a través de oxidación biológica. El proceso que hace posible esta transformación se denomina nitrificación y se representa con las siguientes reacciones:



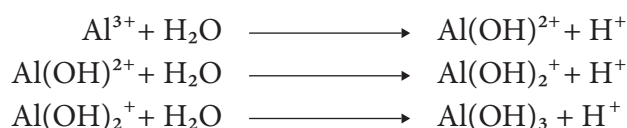
Como se observa la nitrificación produce un exceso de H^+ que acidifica el suelo. Este es un proceso natural necesario para transformar el NH_4^+ en NO_3^- , debido a que las plantas utilizan principalmente NO_3^- en su nutrición. Por otra parte, estas reacciones requieren oxígeno (O_2), por lo tanto, es necesario que el suelo se encuentre bien aireado para que el proceso tenga lugar. La utilización de urea produce también acidificación del suelo, aun cuando las reacciones iniciales son diferentes. Después de la aplicación al suelo, la urea es atacada por la enzima ureasa facilitando la hidrólisis del material. La primera reacción forma carbamato de amonio que es un compuesto inestable. Esta reacción eleva el pH en la inmediata vecindad del gránulo de urea a valores mayores que 8.0. En este ambiente alcalino el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoníaco (NH_3) y CO_2 . Estas reacciones se describen a continuación:



El NH_3 formado al final de estas reacciones es un gas que se volatiliza fácilmente de la superficie del suelo, pudiéndose perder de esta forma apreciable cantidad de N del sistema. El NH_3 en contacto con agua se transforma en NH_4^+ , permaneciendo en esta forma estable en el suelo. Por esta razón, es aconsejable incorporar la urea en el suelo para evitar volatilización. El NH_4^+ formado después de la hidrólisis de la urea pasa por los mismos procesos de oxidación biológica o nitrificación al igual que el NH_4^+ de otras fuentes nitrogenadas. Como ya se discutió anteriormente, este proceso lleva inevitablemente a la acidificación del suelo. Es importante indicar que la mineralización de la materia orgánica también produce NH_4^+ como producto final del proceso de descomposición. Este NH_4^+ contribuye de igual forma a la acidificación del suelo después de que forzosamente pasa por el proceso de nitrificación descrito anteriormente.

8.6.2.3. Aluminio Intercambiable

Es reconocido ampliamente que uno de los principales factores en el desarrollo de la acidez del suelo es la presencia de aluminio (Al^{3+}) en la solución del suelo. Los iones Al^{3+} desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxí-alumínicos. Las reacciones de hidrólisis del Al^{3+} son similares a la reacción de un ácido débil como el ácido acético que libera iones H^+ . La hidrólisis de las formas monoméricas del Al se ilustra en las siguientes reacciones:



Cada una de estas reacciones libera H^+ y contribuye a la acidez del suelo. Este incremento en acidez promueve la presencia de más Al^{3+} listo para reaccionar nuevamente y generar más acidez. La **Figura 8.12** describe el comportamiento de las diferentes formas monoméricas del Al con respecto al pH de una solución. Se observa que el Al^{3+} aparece en la solución a pH 5.3 y que arriba de este pH se inicia la formación de $Al(OH)_3$ que se precipita, eliminando el Al de la solución. Estas reacciones son importantes en el control de acidez en el suelo como se discute más adelante.

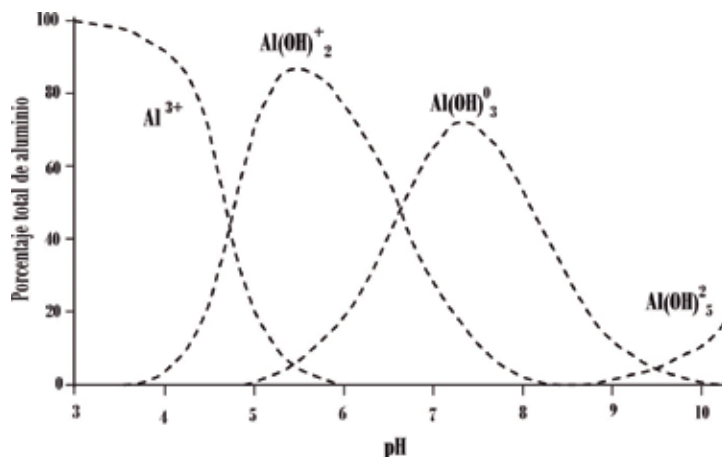


Figura 8.12. Distribución porcentual de las formas de aluminio en una solución de acuerdo con el pH (Havlin, *et al.*, 2014).

8.6.3. Clasificación de la acidez del suelo

La acidez del suelo proveniente de las fuentes mencionadas anteriormente se puede clasificar de la siguiente forma:

Acidez activa: Hidrógeno (H^+) disociado en la solución del suelo proveniente de diferentes fuentes.

Acidez intercambiable: H^+ y Al^{3+} intercambiables retenidos por fuerzas electrostáticas en los coloides del suelo.

Acidez no intercambiable: H en enlace covalente en la superficie de los minerales arcillosos de carga variable.

Acidez potencial: Acidez intercambiable y acidez no intercambiable.

8.6.4. Medición de la acidez del suelo

El pH, determinación rutinaria en el análisis de suelos, es un buen indicador de la acidez. Sin embargo, este parámetro no determina el requerimiento o cantidad de cal necesaria para llegar al rango de pH requerido en el sistema de producción que se está utilizando. La mayor parte de la acidez en los suelos tropicales (excluyendo los suelos orgánicos) proviene del Al^{3+} , pero generalmente se habla de acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) como si fueran sinónimos. La acidez intercambiable se determina mediante la extracción del H^+ y el Al^{3+} del suelo con una sal neutra no tamponada, como KCl 1N. El extracto se titula luego con una base. Para determinar el Al^{3+} se puede titular nuevamente el extracto final. La acidez intercambiable se expresa en $cmol_{(+)} kg^{-1}$ de suelo. Se considera que contenidos de acidez intercambiable en el suelo mayores que $0.5 cmol_{(+)} kg^{-1}$ podrían ser problemáticos para los cultivos. La suma de bases ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+$) es también un parámetro importante por considerar ya que un valor inferior a $5 cmol_{(+)} kg^{-1}$ puede incidir en el rendimiento de los cultivos y se relaciona con suelos de baja fertilidad. Cuando a la suma de bases se le agrega la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) se obtiene la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de un suelo. Con estos valores es posible estimar otros parámetros de diagnóstico. Quizás los más útiles son el porcentaje de saturación de acidez y el porcentaje de saturación de Al. Estos parámetros se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$\text{Saturación de acidez (\%)} = \frac{\text{Acidez intercambiable (cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1})}{\text{CICE} = \text{Al} + \text{H} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K (cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1})} \times 100$$

$$\text{Saturación de aluminio (\%)} = \frac{\text{Aluminio intercambiable (cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1})}{\text{CICE} = \text{Al} + \text{H} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K (cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1})} \times 100$$

La saturación de acidez y la saturación de Al determinan el porcentaje del complejo de intercambio catiónico que está ocupado por Al^{3+} e H^+ o por Al^{3+} . Estos valores constituyen mejores criterios para diagnosticar problemas de acidez. Cada cultivo, variedad o cultivar tiene su grado de tolerancia a la acidez o al Al^{3+} , que depende de las características genéticas de la planta. En términos prácticos se puede utilizar cualquiera de los dos parámetros para diagnosticar problemas de acidez, dependiendo de los parámetros que se obtienen en el laboratorio. En general, se puede indicar que casi ningún cultivo soporta más de 60 % de saturación de acidez intercambiable o de Al^{3+} , y el valor deseable para la mayoría de las plantas oscila entre 10 y 25 %.

8.7. Comportamiento de los suelos ácidos de Ecuador

Ecuador tiene una diversidad de suelos producto de la variedad de materiales parentales y de condiciones ambientales sobre los cuales se desarrollaron. Una apreciable área del territorio ecuatoriano tiene suelos tropicales típicos, sin embargo, existen también suelos más jóvenes dominados por arcillas tipo 2:1 y suelos derivados de cenizas y otros materiales volcánicos. Los suelos tropicales viejos son naturalmente ácidos, mientras que los suelos derivados de otros materiales parentales pueden volverse ácidos después de períodos largos de uso intenso. En cualquier caso, es necesario controlar la acidez de esos suelos para poder incrementar y sostener los rendimientos agrícolas, pero no se puede utilizar una sola estrategia debido a que las características químicas particulares de los diferentes tipos de suelos son las que finalmente determinan el método de control de acidez más efectivo.

Utilizando los datos de la capa de Geopedología del Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2021) se desarrolló el mapa general de la distribución del pH y de la acidez intercambiable en los suelos de Ecuador (**Figura 8.13 a y b**) usando los siguientes parámetros de acidez: Alta: [acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) > 1.5 cmol kg^{-1}], Media: 0.5 – 1.5 cmol kg^{-1} , Ligera: < 0.5 cmol kg^{-1} .

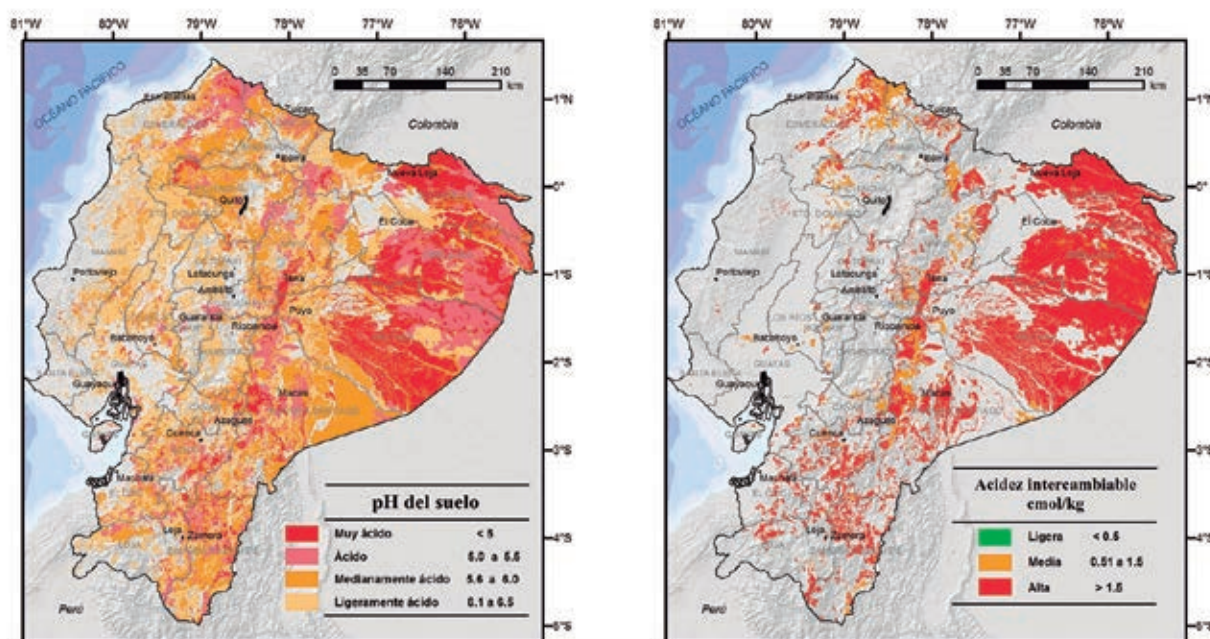


Figura 8.13. Distribución de los suelos ácidos en Ecuador: **a)** por pH del suelo y **b)** por acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$). Figuras procesadas a partir de la capa de Geopedología del Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2021).

La acidez está presente en un 23.9 % de los suelos del Ecuador y en la región Amazónica es donde se concentra el mayor porcentaje de suelos ácidos (19.8 %) con predominio de acidez alta (18.7 %) en las provincias de Sucumbíos, Pastaza, Orellana, Morona Santiago y Zamora Chinchipe, cuyos suelos están clasificados, en su mayoría, como Inceptisoles y Ultisoles. En la Sierra, los suelos ácidos se ubican principalmente en las provincias de Azuay, Carchi, Loja, Tungurahua, Cañar y Pichincha, la mayoría en suelos clasificados como Andisoles e Inceptisoles. En la región Costa, las provincias de Esmeraldas y el Oro presentan el mayor porcentaje de acidez alta en suelos predominantemente Inceptisoles (Chico, 2019). Sin embargo, la acidificación del suelo inducida por manejo afecta varios sectores de producción de la Costa. Mite (2013) encontró que el 28.2 % de 22 346 muestras de suelos provenientes de haciendas bananeras del país analizadas en los laboratorios de INIAP era ácido.

8.7.1. Manejo de la acidez en suelos de carga permanente

Los suelos dominados por minerales arcillosos de tipo 2:1 (montmorillonita, vermiculita), que predominan en las zonas templadas del mundo, también están presentes en Ecuador en las zonas que por modificaciones de los factores de intemperización no pasaron por un proceso intenso de envejecimiento. Estos suelos están ubicados en las zonas más secas del país como en la sección occidental de la Costa y la Sierra Norte y la Sierra Sur (**Figura 8.9**). Los suelos de la Costa se desarrollaron sobre rocas sedimentarias provenientes de la actividad volcánica antigua durante el largo proceso de levantamiento de los Andes, mientras que los suelos de la Sierra Centro Norte y Sierra Sur se desarrollaron sobre rocas metamórficas provienen del mismo proceso tectónico antiguo de los Andes (Zebrowski y Sourdat, 1997) (**Figura 8.11**). Los suelos de la mayoría de esta sección de la Costa están dominados por arcillas pesadas y pegajosas, características típicas de la montmorillonita y la vermiculita. Sin embargo, las condiciones impuestas por los movimientos tectónicos antiguos en el relieve de la Sierra Centro y Sierra Sur produjeron una gradiente climática con abundantes precipitaciones en las zonas altas que gradualmente se redujeron hasta generar zonas secas de baja precipitación. Por esta razón, los suelos de las partes altas de la Sierra Centro son ferralíticos-fersialíticos, en las partes intermedias son moderadamente evolucionados con características mólicas o vérticas y en las zonas bajas los suelos son poco evolucionados con predominio de Vertisoles. Por otro lado, los suelos de las partes altas de la Sierra Sur son fersialíticos saturados, en la zona media son paleosuelos ferralíticos desaturados y en las zonas bajas predominan vertisoles rodeados por paleosuelos fersialíticos (Zebrowski y Sourdat, 1997). Los paleosuelos son suelos rojos muy viejos producto de la normal meteorización de las zonas tropicales antes que aparezcan los Andes.

En los suelos dominados por arcillas de tipo 2:1, como los suelos de la sección occidental de la Costa y de la Sierra Centro y Sierra Sur (exceptuando los suelos ferralíticos y los paleosuelos), la reducción en saturación de bases (pérdida de K, Ca y Mg) desarrolla acidez. Este incremento en acidez (reducción del pH) conduce a la ruptura de la estructura de los cristales de las arcillas y a la liberación del Al estructural. Este Al ocupa los sitios de intercambio dejados por las bases desplazadas. Estos suelos, por tener arcillas de superficie de baja reactividad, fácilmente pueden encalarse hasta llegar a pH 7.0, valor alrededor del cual se obtienen los mejores rendimientos de los cultivos. El incremento de pH logrado con el encalado incrementa poco o nada la CIC del suelo (suelos de carga permanente).

No es común encontrar suelos ácidos en la sección occidental de la Costa, condición que aparece en lugares donde se hace agricultura intensiva donde se hacen continuas aplicaciones de dosis altas de fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, en la Sierra Centro y Sierra Sur son más frecuentes los reportes de acidez en los suelos jóvenes dominados por arcillas 2:1. Un ejemplo de estos suelos es el Inceptisol ácido ubicado en la Independencia, Loja, cuyo perfil y descripción se presentan en **Figura 8.14** y en el **Cuadro 8.1**.



Figura 8.14. Perfil del suelo clasificado como Typic Dystrudepts (izquierda) ubicado en el sitio Independencia, Loja, sobre el cual se cultivan pastos (derecha (MIDENA, *et al.*, 2013d).

Cuadro 8.1. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Dystrudepts (MIDENA, *et al.*, 2013d).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-10	Color pardo grisáceo oscuro (10YR 3/2) en húmedo, textura: arcillosa, estructura: granular, pH: 5.2, materia orgánica: 6.5 %, CIC: 25 cmol kg ⁻¹ , saturación de bases: 62.6 %, acidez intercambiable: 1.2 cmol kg ⁻¹
A	10-18	Color pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo, textura arcillosa, estructura: granular a bloques subangulares, pH: 5.3, materia orgánica: 3 %, CIC: 23 cmol kg ⁻¹ , saturación de bases: 57.4 %, acidez intercambiable: 4.2 cmol kg ⁻¹ .
Bw	18-50	Color gris parduzco claro (10YR 6/2) en húmedo, textura franco arcillosa, estructura: bloques angulares, pH: 5.6, materia orgánica: 1.3 %, CIC: 33 cmol kg ⁻¹ , saturación de bases: 47.7 %.
BC	50-80	Color gris parduzco claro (2.5Y 6/2) en húmedo, color secundario rojo amarillento (5YR 5/8) en húmedo, textura franco limosa, estructura: masiva a bloques subangulares, pH: 5.4, materia orgánica: 0.2 %, acidez intercambiable: 10.6 cmol kg ⁻¹ .
C	80-110+	Color gris amarillo pálido (2.5YR 7/4), color secundario amarillo rojizo (7.5YR 7/8) en húmedo, textura franco arcillo arenosa, sin estructura (masiva).

En la literatura no existen reportes de manejo de la acidez en este tipo de suelos de la Sierra Centro y Sierra Sur, pero para ilustrar el efecto del encalado en suelos de esta naturaleza se presentan los datos del **Cuadro 8.2** que muestran el efecto del encalado en el control de acidez en un Mollisol de Argentina. En este suelo, dominado por arcillas de tipo 2:1, el encalado incrementa fácilmente el pH a valores cercanos a 7.0 con una importante respuesta en el rendimiento de soya y maíz. Además, por ser un suelo de carga permanente, la CIC no cambia con el incremento de pH.

Cuadro 8.2. Efecto de la aplicación de dolomita en el pH, contenido de bases, CIC y en el rendimiento de soya y maíz en un Mollisol de Santa Fe, Argentina (Gambaudo y Fontanetto, 1995; Gambaudo y Fontanetto, 1997).

Dolomita kg ha ⁻¹	pH	Ca	Mg	Na	K	CIC*	Rendimiento, kg ha ⁻¹	
							Soya	Maíz
----- cmol(+) kg ⁻¹ -----								
0	5.7	7.8	1.6	0.4	0.8	14.2	2622	8397
2000	6.5	9.0	1.8	0.4	0.8	14.2	3368	9942
4000	6.8	9.7	1.9	0.4	0.7	14.4	3365	10249

* CIC medida con acetato de amonio pH 7.0.

Un método común para determinar las necesidades de cal en suelos de carga permanente utiliza soluciones tampón. La solución tampón más popular es la SMP buffer (Shoemaker, *et al.*, 1961) desarrollada para suelos ácidos de Ohio, E.U. Esta solución está compuesta de p-nitrofenol, trietanolamina, cromato de potasio, acetato de calcio y cloruro de calcio todo ajustado a pH 7.5. Los valores de pH de equilibrio de la suspensión suelo - agua - solución tampón en una relación 5:5:10, de varias muestras de suelo, se correlacionan con la cantidad de cal necesaria para elevar el pH a un valor de 6.8 determinada por incubación de las mismas muestras de suelo con CaCO₃. De este modo se obtiene una curva de calibración con cuyos datos se puede construir una tabla de recomendación que determina la cantidad de cal necesaria para lograr determinado pH. Un ejemplo de una adaptación del método a suelos del Sur de Brasil se presenta en el **Cuadro 8.3**.

Cuadro 8.3. Cantidad de cal a añadirse de acuerdo con el cambio de pH de la suspensión suelo-solución buferizada (método SMP) y el pH al cual se requiere llegar en suelos del sur de Brasil (Tedesco, *et al.*, 2004).

Índice SMP	pH deseado después de encalar			Índice SMP	pH deseado después de encalar		
	5.5	6.0	6.5		5.5	6.0	6.5
----- CaCO ₃ (t ha ⁻¹) -----							
< 4.4	15.0	21.0	29.0	5.7	2.8	4.8	7.0
4.5	12.5	17.3	24.0	5.8	2.3	4.2	6.3
4.6	10.9	15.1	20.0	5.9	2.0	3.7	5.6
4.7	9.6	13.3	17.5	6.0	1.6	3.2	4.9
4.8	8.5	11.9	15.7	6.1	1.3	2.7	4.3
4.9	7.7	10.7	14.2	6.2	1.0	2.2	3.7
5.0	6.6	6.9	13.3	6.3	0.8	1.8	3.1
5.1	6.0	9.1	12.3	6.4	0.6	1.4	2.6
5.2	5.3	8.3	11.3	6.5	0.4	1.1	2.1
5.3	4.8	7.5	10.4	6.6	0.2	0.8	1.6
5.4	4.2	6.8	9.5	6.7	0	0.5	1.2
5.5	3.7	6.1	8.6	6.8	0	0.3	0.8
5.6	3.2	5.4	7.8	6.9	0	0	0.2

Estos métodos funcionan satisfactoriamente en suelos de carga permanente y son recomendables para suelos ácidos dominados por arcillas de tipo 2:1. Nótese que las cantidades de cal a utilizarse son altas porque se busca llegar a un pH cercano a 7.0. En suelos ácidos tropicales de carga variable (Oxisoles, Ultisoles y Andisoles) el uso de esta metodología recomienda cantidades muy altas de cal que no son realmente necesarias.

8.7.2. Manejo de la acidez en suelos viejos de carga variable

En Ecuador, los suelos viejos y ácidos se encuentran localizados en las áreas donde los factores de intemperización han podido cambiar las arcillas de tipo 2:1 en arcillas de tipo 1:1 y sesquióxidos de Fe y Al, arcillas dominantes en suelos clasificados como Oxisoles, Ultisoles e Inceptisoles óxicos. Los métodos descritos anteriormente para determinar los requerimientos de cal en suelos de carga permanente no funcionan satisfactoriamente en estos suelos que tienen carga variable. En estos suelos, que han sufrido un proceso severo de meteorización, las arcillas son estables hasta valores de pH tan bajos como 5.3. A diferencia de los suelos dominados por arcillas de tipo 2:1, el Al presente en las arcillas 1:1 y los sesquióxidos está fijo en la partícula de arcilla y no amenaza el crecimiento de la planta hasta que el pH del suelo llega a valores donde los óxidos, hidróxidos y caolinita se disuelven y liberan Al a la solución del suelo. Esto ocurre generalmente a pH entre 5.0 a 5.3. Cuando esto ocurre es aconsejable elevar el pH a valores de alrededor de 5.5 lo que permite la precipitación del Al e incrementa apreciablemente la CIC (suelos de carga variable). Este incremento en pH es suficiente para el adecuado crecimiento y rendimiento de los cultivos.

La mayoría de los suelos ácidos en Ecuador se encuentran localizados en la Amazonía y en la sección noreste de la provincia de Esmeraldas (**Figura 8.15**), donde se ha incrementado la frontera agrícola en detrimento de la bosque tropical y apreciables áreas son utilizadas para cultivar palma aceitera, café, naranjilla, pitahaya, cacao, maíz y otros cultivos que crecen con evidentes problemas de acidez que deben controlarse mediante encalado (Granda, 2005). Estos suelos están clasificados como Oxic Dystrudepts (MIDENA, *et al.*, 2015; Sánchez, *et al.*, 2018), es decir, son Inceptisoles que todavía no se han meteorizado lo suficiente para llegar a ser Ultisoles u Oxisoles, sin embargo, el proceso está en marcha y le ha conferido ya al suelo características óxicas (pH bajo y suficiente contenido de Al⁺³ para limitar el crecimiento de los cultivos) (**Cuadro 8.4**) (Zebrowski y Sourdat, 1997; Soil Survey Staff, 2006).



Figura 8.15. Perfil de suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (izquierda) ubicado en el sitio Calderón, San Lorenzo, Esmeraldas, en un relieve colinado muy bajo de la Formación Cachaví (grava, arena y arcillas diluviales), donde se cultiva palma africana (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2015).

Cuadro 8.4. Descripción de las características del perfil de suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (MIDENA, *et al.*, 2015).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-18	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: arcillosa (62 % de arcilla); estructura: granular; pH: 4.5; acidez intercambiable: 3.9 cmol kg ⁻¹ ; materia orgánica: 8.0 %; CIC: 26 cmol kg ⁻¹ y saturación de bases: 11 %.
Bw	18-45	Color: pardo fuerte (7.5YR 4/6) en húmedo; textura: arcillosa (66 % de arcilla); estructura: bloques subangulares; pH: 4.8; acidez intercambiable: 2.4 cmol kg ⁻¹ ; materia orgánica: 3.1 %; CIC: 21 cmol kg ⁻¹ y saturación de bases: 13.2 %.
C	45-100+	Color principal: rojo (2.5YR 4/8) en húmedo; color secundario: amarillo parduzco (10YR 6/8) en húmedo; textura arcillosa; sin estructura (masiva).

Existe poca información en la literatura sobre control de acidez en los suelos de la Amazonía ecuatoriana, sin embargo, un estudio en condiciones controladas conducido por Calva y Espinosa (2017) en un suelo de Loreto, Orellana, provee de adecuada información para manejar la acidez en suelos rojos y ácidos. En este suelo, que originalmente tenía un pH de 5.2, una concentración de acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) de $0.52 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$ y un contenido de aluminio intercambiable (Al^{3+}) de $0.36 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$, se evaluó el efecto de la aplicación de dosis de carbonato de calcio (cal agrícola, $CaCO_3$) y dolomita [$CaMg(CaCO_3)_2$] en el crecimiento de una planta indicadora y en el control de la acidez del suelo. La respuesta a la aplicación de las dos enmiendas en términos de acumulación de materia seca y cambios en la acidez y aluminio intercambiables se presentan en la **Figura 8.16**.

Si solamente se utilizaran los datos de las regresiones de producción de materia seca de la **Figura 8.16** para determinar la dosis de carbonato de calcio y dolomita se podrían recomendar dosis de 2.0 a 2.5 $t \text{ ha}^{-1}$, pero el ajuste de valores que se logra con el cálculo de la regresión con los datos de producción de biomasa llevaría a aplicar dosis muy altas de las enmiendas que no son necesarias. Sin embargo, el comportamiento de la respuesta a las enmiendas en términos de acumulación de biomasa indica claramente que las dosis para lograr el mayor rendimiento se encontraban entre 1.0 y 1.5 $t \text{ ha}^{-1}$ de enmienda, dosis que serían suficientes para elevar el pH a valores que permitan eliminar los problemas de acidez y precipitar el Al^{3+} tóxico. Las dosis de 1.0 a 1.5 $t \text{ ha}^{-1}$ elevaron el pH a valores de alrededor de 5.8. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en suelos tropicales (De Mello Prado and Natalle, 2004; Osorno y Osorno, 2010; Cravo, *et al.*, 2012; Fageria and Nascente, 2014). Es evidente que las dosis altas de las enmiendas utilizadas (3.0 y 4.0 $t \text{ ha}^{-1}$) eliminan casi completamente la acidez y el aluminio intercambiables. Sin embargo, de lo observado en la acumulación de biomasa (**Figura 8.16**) se puede concluir que las bajas concentraciones de acidez y aluminio intercambiables remanentes después de la aplicación de 1.0 a 1.5 $t \text{ ha}^{-1}$ de las enmiendas no afectaron el crecimiento de la planta indicadora debido a que se ha

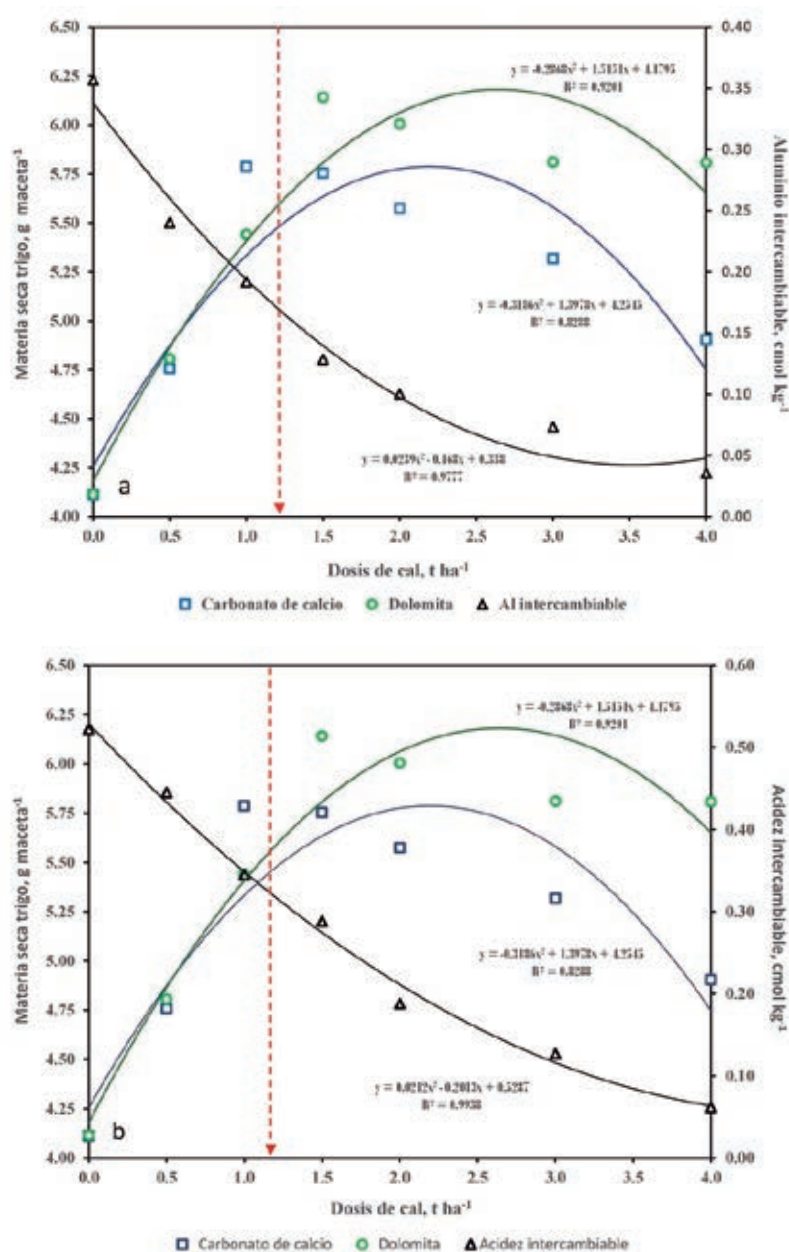


Figura 8.16. Efecto de aplicación de carbonato de calcio y dolomita en la producción de materia seca de trigo y en el contenido de acidez y aluminio intercambiables. Adaptado de Calva y Espinosa (2017).

controlado la mayoría del Al^{+3} tóxico, que es lo que realmente afecta a la planta (Batista, *et al.*, 2012). Esta información no deja dudas que las dosis de enmienda a aplicarse están alrededor de $1.0\text{-}1.5 \text{ t ha}^{-1}$, sin embargo, es necesario encontrar una forma práctica de determinar cuál es la dosis de enmienda para los suelos ácidos rojos de la Amazonía ecuatoriana y los suelos del noreste de la provincia de Esmeraldas.

Kamprath (1984), en su búsqueda de métodos fáciles y efectivos para determinar la dosis de enmienda necesaria para controlar los problemas de acidez en suelos tropicales propuso utilizar solamente cantidades de enmienda que precipiten el Al^{+3} y eliminen su efecto tóxico. Esto ante la pretensión de utilizar los métodos de recomendación de enmiendas usados para controlar acidez en suelos de carga permanente de Norteamérica que generan recomendaciones de altas cantidades de cal que no son necesarias en suelos tropicales de carga variable. La propuesta de Kamprath se resume en la siguiente fórmula:

$$\text{CaCO}_3 (\text{t ha}^{-1}) = \text{Factor} \times \text{cmol}_{(+)} \text{Al}^{+3} \text{ kg}^{-1} \text{ de suelo}$$

El factor puede ser 1.5 o 2.0, dependiendo de las características del cultivo y el tipo de suelo y podrá modificarse con la experiencia obtenida utilizando este factor en condiciones específicas de suelo. Este método de determinación de los requerimientos de cal es muy difundido en áreas tropicales de suelos rojos (Espinosa y Molina, 1999; Osorno y Osorno, 2010) como los suelos rojos de Ecuador.

Los datos de la **Figura 8.16** demuestran que el contenido de Al^{+3} predice mejor la dosis de enmienda que produce la mayor acumulación de biomasa de la planta indicadora. Éste sería el parámetro para utilizarse en la fórmula de Kamprath, sin embargo, esto requiere de una doble titulación del extracto obtenido con la agitación con $\text{KCl } 1\text{N}$ y este paso no está incluido en la rutina de las determinaciones de todos los laboratorios de suelos de Ecuador, que solamente determinan acidez intercambiable. Entonces se propone utilizar el contenido de acidez intercambiable como parámetro para el cálculo en la fórmula de Kamprath. De esta forma, el cálculo utilizando un factor de 2.0 quedaría de la siguiente forma para el suelo estudiado de Loreto:

$$\text{CaCO}_3 (\text{t ha}^{-1}) = 2.0 \times 0.52 \text{ cmol}_{(+)} \text{ de acidez intercambiable kg}^{-1} \text{ de suelo} = 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ CaCO}_3$$

Las relaciones entre pH, acidez intercambiable, aluminio intercambiable y acumulación de biomasa encontradas en el estudio de Calva y Espinosa (2017) permiten demostrar que la utilización del método de Kamprath es efectiva para determinar la dosis de cal necesaria para controlar los problemas de acidez de los suelos rojos ácidos de la Amazonía ecuatoriana y de la sección noreste de la provincia de Esmeraldas. Los parámetros necesarios son pH (los suelos deben tener pH menor a 5.5 para que necesiten encalado) y acidez intercambiable.

Siempre ha sido problemático para los agricultores el recolectar muestras de suelo y enviarlas al laboratorio, en especial en zonas de la Amazonía. Una de las limitantes era la dificultad de enviar la muestra a sitios lejanos. Al momento, la disponibilidad de una buena carretera y la cercanía del laboratorio de suelos en la Estación Experimental Central de la Amazonía del INIAP, ubicada en el sector San Carlos, cantón Joya de los Sachas, abre la oportunidad para que los técnicos asesores del MAG y los propios productores puedan enviar muestras para análisis con el fin de disponer de la información necesaria para la aplicación de cal en los suelos de la provincia de Orellana.

Por otro lado, los suelos de la Sierra Centro y Sierra Sur son una mezcla de suelos de carga permanente (dominados por arcillas de tipo 2:1) y suelos rojos de carga variable (dominados por arcillas 1:1 y sequióxidos de Al y Fe). Los órdenes más comunes dentro del grupo de suelos rojos son Inceptisoles y Ultisoles. Dentro de los Inceptisoles se encuentran los suelos clasificados como Oxic Dystrudepts (**Figura 8.17** y **Cuadro 8.5**), sobre los cuales se cultiva maíz y maní, productos

que dinamizan la economía en el lugar y que luego se alternan con pastizales en la época seca (IGM, 2021). Los Ultisoles son suelos muy antiguos (paleosuelos) que se caracterizan por tener un horizonte Bt, baja saturación de bases y alta acidez, lo que indica que se desarrollaron en una época con más humedad que la actual (**Figura 8.18** y **Cuadro 8.6**). En estos suelos también se conduce intensa agricultura en la que se incluyen cultivos como el café.



Figura 8.17. Perfil de suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (izquierda), con colores pardos en la superficie y rojo amarillentos a profundidad, localizado en un relieve montañoso, en Aguasillas, parroquia Catacocha, cantón Paltas, provincia de Loja (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013c).

Cuadro 8.5. Características del perfil de suelo clasificado como Oxic Dystrudepts (MIDENA, *et al.*, 2013c).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A1	0-12	Color: pardo amarillento (10YR 5/4) en seco, pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; textura: arcilla pesada (62 % arcilla); estructura: bloques subangulares; pH: 5.5; materia orgánica: 6.9 %; CIC: 24 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 47.5 % y acidez intercambiable: 0.7 cmol kg ⁻¹ .
A2	12-22	Color: pardo amarillento (10YR 5/4) en seco, pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; textura: arcilla pesada (70 % arcilla); estructura: bloques subangulares; pH: 5.3; materia orgánica: 3.8 %; CIC: 21 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 31.6 % y acidez intercambiable: 2.5 cmol kg ⁻¹ .
Bw	22-39	Color: pardo oscuro (7.5YR 3/3) en húmedo; textura: arcilla pesada (78 % arcilla); estructura: bloques subangulares con fragmentos gruesos del tipo de grava media; pH: 5.4; materia orgánica: 3.1 %; CIC: 24 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 21.8 % y acidez intercambiable: 3 cmol kg ⁻¹ .
C1	39-60	Color: pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo; textura: arcillosa; sin estructura (masiva); fragmentos de grava gruesa; pH: 5.4; materia orgánica: 1.6 % y acidez intercambiable: 6.6 cmol kg ⁻¹ .
C2	60-77+	Color: rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo; textura: arcillosa; sin estructura (masiva).



Figura 8.18. Perfil de suelo clasificado como Typic Hapludults (izquierda), en el cual es evidente la presencia de un horizonte Bt de color pardo grisáceo muy oscuro. El suelo está ubicado en un relieve montañoso, en el sitio Citoque, parroquia Alamor, cantón Puyango, provincia de Loja, sobre el cual predominan los pastizales (MIDENA, *et al.*, 2013b).

Cuadro 8.6. Características del perfil de suelo clasificado como Typic Hapludults (MIDENA, *et al.*, 2013b).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-15	Color: pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; textura: franco arcillosa; estructura: bloques subangulares; pH: 4.9; materia orgánica: 9.8 %; CIC: 25 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 14.0 % y acidez intercambiable: 2.5 cmol kg ⁻¹ .
Bt	15-30	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: arcillosa (58 % arcilla); estructura: bloques subangulares, friable; pH: 5.2; materia orgánica: 5 %; CIC: 22 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 10.5 % y acidez intercambiable: 3.6 cmol kg ⁻¹ .
BC	30-41	Color: primario pardo amarillento (10YR 5/8) y secundario pardo (10YR 4/3) en húmedo; textura: arcillosa; estructura: masiva (sin estructura).
C	41-60+	Color: primario pardo fuerte (7.5YR 5/8) y secundario amarillo parduzco (10YR 6/8) en húmedo; textura: arcillosa (54 % arcilla); estructura: masiva (sin estructura); pH: 5.8; materia orgánica: 0.1 %.

De igual manera, estos suelos tienen altos contenidos de acidez y aluminio intercambiables que limitan la producción agrícola y que, en consecuencia, deben encalarse para controlar los problemas de acidez. Estos suelos responden al encalado de la misma forma que los suelos de la Amazonía, es decir, se deben encalar solamente hasta precipitar el Al³⁺ tóxico como lo demuestran los datos de Villamagua, *et al.* (2021) quienes evaluaron el efecto de la aplicación de tres dosis del carbonato de calcio en un Kandiudults en un sistema agroforestal de café (café de 30 meses y aliso) ubicado a 2 080 m s. n. m. en Pueblo Nuevo, Loja. Los resultados del experimento presentados en el **Cuadro 8.7** demuestran que la aplicación de cal hasta llegar a pH 5.4 precipitó todo el Al³⁺ y mejoró ostensiblemente los componentes de la producción de la planta de café. Es importante notar el efecto del encalado en la CIC que pasó de 6.8 a 13.0 cmol(+) kg⁻¹ con la aplicación de 5 t ha⁻¹ de cal, demostrando claramente la naturaleza variable de la carga de las arcillas predominantes en este suelo. Utilizando la fórmula de Kamprath se necesitarían alrededor de 4 t ha⁻¹ de carbonato de calcio para eliminar el problema del Al³⁺ tóxico. Datos semejantes fueron reportados por Vélez (2015) en suelos de similares características en Carigán Alto, Loja.

Cuadro 8.7. Efecto de la aplicación de dosis de cal en el contenido de acidez y aluminio intercambiables y en los componentes de la producción del café cultivado en un Ultisol de Loja. Adaptado de Villamagua, *et al.* (2021).

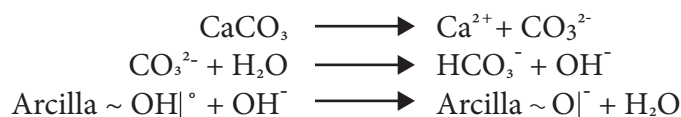
Dosis t ha ⁻¹	pH	Al + H -----	Al cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	CIC -----	Altura cm	Número de hojas
0	5.0	3	1.9	6.8	41.7	44
5.0	5.4	0	0	13.0	45.6	68
6.3	5.5	0	0	12.1	47.5	64

8.7.3. Manejo de la acidez en suelos derivados de ceniza volcánica

Los suelos derivados de ceniza volcánica del Ecuador se ubican en la Sierra Norte y en los flancos exteriores de los Andes hacia la Costa y la Amazonía, pero la dispersión de las cenizas por el viento permitió la formación de suelos volcánicos en amplias áreas de la Costa y la Amazonía (**Figura 8.11**). La fracción arcilla de estos suelos está dominada por complejos humus-Al, alofana e imogolita (minerales amorfos de rango corto) (**Figura 8.3**) que provienen de la meteorización de los materiales piroclásticos producto de las deposiciones volcánicas. La altitud modifica radicalmente el clima en las tierras altas de la Sierra Norte donde es fácil encontrar una diversidad de microclimas que cambian en distancias relativamente cortas. Esta es la razón para la gran diversidad de cultivos que son posibles en el trópico solamente gracias a la modificación del clima por la altitud. Además, si existe disponibilidad de agua, se puede producir todo el año ya que el efecto de las estaciones es apenas perceptible. La mayoría de los suelos volcánicos de la Sierra Norte se clasifican como Andisoles y Mollisoles, sin embargo, la presencia de microclimas ha afectado el desarrollo de los suelos volcánicos en secciones particulares donde es posible encontrar Entisoles, Inceptisoles y Aridisoles.

Algunos de los Andisoles y Mollisoles desarrollados en el área que fue cubierta con ceniza volcánica son ácidos o pueden desarrollar acidez por el uso constante de fertilizantes nitrogenados. Estos suelos tienen una alta capacidad tampón (resistencia al cambio de pH) y una moderada CIC. Estos factores hacen que la determinación de los requerimientos de cal en estos suelos sea más complicada que la corrección de acidez en suelos rojos viejos. Por esta razón, no existe una regla simple para evaluar los requerimientos de cal en estos suelos. El uso del criterio del aluminio intercambiable (Al³⁺) utilizado en suelos rojos viejos, en ciertos casos, subestima y en otros sobrestima la necesidad de cal en Andisoles.

La alta capacidad tampón de los Andisoles se debe a que las arcillas resultantes de la meteorización de las cenizas volcánicas (alofana, imogolita y complejos humus-Al) tienen una superficie muy reactiva. En este caso los OH⁻ producidos por hidrólisis del ion CO₃⁻ (producto de las reacciones de la cal) crean carga en la superficie de las arcillas por deprotonación (pérdida de H⁺), en consecuencia, no incrementan el pH de la solución del suelo, pero incrementan la CIC (carga variable), como se describe en las reacciones a continuación (Uehara and Gillman, 1981):



Esta resistencia al cambio de pH de los suelos de carga variable (Andisoles, Ultisoles y Oxisoles) obligaría a utilizar cantidades muy altas de cal para llegar a pH 7.0. Obviamente esto no es necesario y solamente es conveniente el elevar el pH hasta valores un poco más arriba de lo necesario para precipitar el Al³⁺ (5.3 - 5.5). Sin embargo, en Andisoles, la cantidad de cal necesaria para controlar la acidez intercambiable depende de la magnitud de la capacidad tampón, condición que a su vez varía de un sitio a otro de acuerdo con los factores que controlan la meteorización de la ceniza como la altitud, fisiografía, precipitación, temperatura y edad del material. Por esta razón, los métodos tradicionales de determinar los requerimientos

de cal en suelos rojos de carga variable no funcionan adecuadamente en Andisoles y es necesario conducir experimentos simples que determinen exactamente los requerimientos de cal de un sitio específico.

El experimento reportado por Espinosa y Molina (1999), conducido en un Andisol clásico (Melanudands), similar al presentado en la **Figura 8.19** y **Cuadro 8.8**, ilustra bien el comportamiento de este tipo de suelos. Los datos en el **Cuadro 8.9** y la **Figura 8.20** muestran el efecto del encalado en el control de la acidez y en el rendimiento de varios cultivos. El sitio se había acidificado por el continuo uso de fertilizantes nitrogenados. Si se utilizan los criterios de control de acidez de los suelos rojos, se deberían aplicar 4 t ha⁻¹ de cal (2.1 cmol₍₊₎ kg⁻¹ de acidez intercambiable x 2). En este caso, esta cantidad de cal obviamente no fue suficiente para precipitar el Al y permitir un buen rendimiento de los cultivos, particularmente en cultivos sensibles a la acidez como los prevalentes en esta zona de Ecuador. La dosis de 6 t ha⁻¹ fue la que permitió controlar casi completamente la acidez intercambiable con solamente incrementar el pH a 5.3 y, además, fue la dosis hasta donde se obtuvo respuesta en los tres cultivos evaluados (haba, cebada y avena). Las dosis más altas no incrementaron los rendimientos. En este caso, la necesidad de aplicar una cantidad apreciable de cal para controlar la acidez (6 t ha⁻¹) se debe a la alta capacidad tampón del suelo. Sin embargo, en otros Andisoles la capacidad tampón es menor y en consecuencia se debe aplicar menor cantidad de la enmienda.

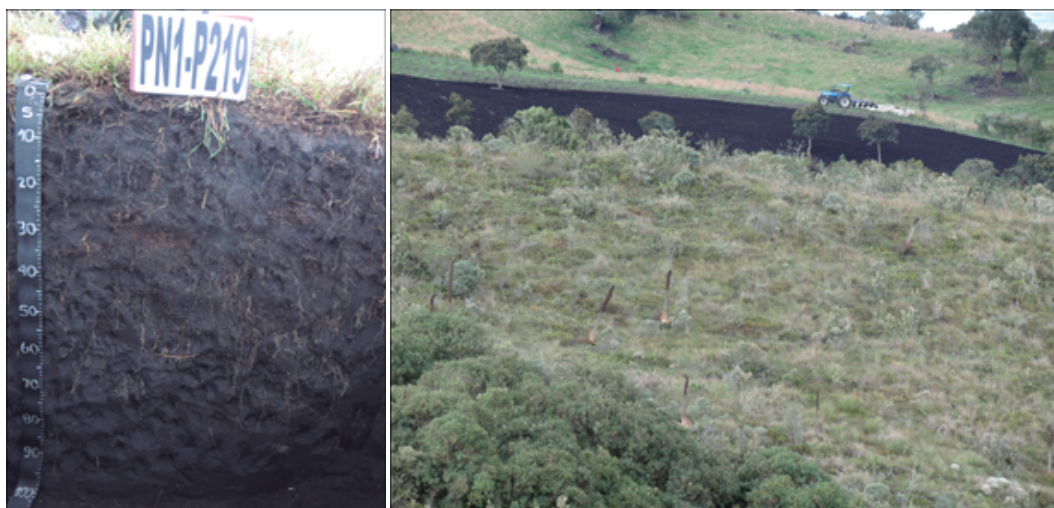


Figura 8.19. Perfil de suelo clasificado como Pachic Melanudands (izquierda), localizado en San José, parroquia Tulcán, cantón Tulcán, provincia de Carchi, sobre un relieve volcánico colinado medio (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2014).

Cuadro 8.8. Características del perfil de suelo clasificado como Pachic Melanudands (MIDENA, *et al.*, 2014).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-40	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura: franco arenosa; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF; densidad aparente: 0.58 g cm ⁻³ ; pH: 5.2; acidez intercambiable: 3 cmol kg ⁻¹ ; materia orgánica: 20.4 %; CIC: 33 cmol kg ⁻¹ y saturación de bases: 5.5 %.
A	40-110+	Color: negro (10YR 2/1) en húmedo; textura en campo: franco arenosa; estructura: masiva a bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 5.4; acidez intercambiable: 1.60 cmol kg ⁻¹ ; materia orgánica: 14.86 %; CIC: 34 cmol kg ⁻¹ ; saturación de bases: 4.59 %.

Cuadro 8.9. Efecto de la aplicación de cal en el pH, acidez intercambiable y el rendimiento de tres cultivos en un Melanudand ubicado en Cutuglahua, Mejía, Pichincha (Espinosa y Molina, 1999).

CaCO ₃ t ha ⁻¹	pH	Al ³⁺ + H ⁺ cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	CIC*	Rendimiento, t ha ⁻¹		
				Haba	Cebada	Avena
0	5.0	2.1	6.0	13.9	2.2	3.6
1.5	5.1	1.5	6.2	12.8	3.0	4.4
3.0	5.2	1.6	6.6	17.1	2.9	4.3
4.5	5.2	1.5	7.2	18.9	3.7	4.4
6.0	5.3	0.6	7.2	19.2	3.9	4.7
9.0	5.4	0.4	7.4	21.5	3.9	5.2
12.0	5.4	0.2	8.4	21.6	4.1	4.8
15.0	5.8	0.1	10.7	21.0	4.3	4.7

* CIC medida con una sal indiferente

Se ha sugerido que la determinación de Al³⁺ utilizando KCl 1N para la extracción sería también un parámetro adecuado para determinar la necesidad de encalado en suelos volcánicos, sin embargo, esta determinación no es eficiente en este tipo de suelos porque la fuerza iónica del KCl extrae formas de Al, particularmente las ligadas con la materia orgánica, que normalmente no son parte del Al³⁺ activo tóxico para las plantas (Zapata, 1996; Ortiz, *et al.*, 2006). La investigación conducida por Alvarado (1999) determinó que, del total del Al intercambiable extraído con KCl 1 N en suelos ácidos del Ecuador, entre 2 y 27 % del Al está ligado a la materia orgánica (**Cuadro 8.10**). La diferente capacidad tampón y la dificultad de determinar el contenido de Al³⁺ tóxico para las plantas en suelos derivados de ceniza volcánica obligan a buscar alternativas para determinar la necesidad de cal que pueda controlar la acidez en suelos volcánicos.



Figura 8.20. Efecto de la aplicación de cal en el pH del suelo y en el rendimiento de haba (*Vicia faba*) en un suelo clasificado como Melanudands en Cutuglahua, Mejía, Pichincha (Espinosa y Molina, 1999).

Cuadro 8.10. Caracterización del aluminio extraído con solución de KCl 1 N de suelos ácidos del Ecuador. Adaptado de Alvarado (1999).

Procedencia del suelo	pH	MO %	Al+H	Al total		
				cmol ₍₊₎ kg ⁻¹		
Pugro, Pichincha	4.7	5.7	0.55	0.259	0.233	0.026
San Javier, Carchi	5.1	20.1	1.90	0.810	0.594	0.216
Cutuglagua, Pichincha	4.7	6.5	1.36	0.507	0.369	0.138
Coca, Napo	4.5	0.1	5.47	4.048	3.970	0.078
Saraguro, Loja	4.5	5.5	2.30	1.214	1.074	0.140
Sayausí, Azuay	4.3	33.5	3.44	1.613	1.252	0.361

Una de estas alternativas es la de conducir experimentos formales de campo que permitan determinar la cantidad de cal necesaria para eliminar la acidez que puede limitar el normal desarrollo del cultivo. El experimento se inicia marcando algunas parcelas de igual tamaño en una sección del campo que sea uniforme y representativa. El tamaño de las parcelas puede estar alrededor de 25 m² (5 X 5 m), pero esto depende de la disponibilidad de terreno y de la facilidad para manejar el experimento. En lo posible, es aconsejable tener por lo menos tres repeticiones de los tratamientos acomodadas al azar en bloques. Cada una de las parcelas debe recibir primero una aplicación básica de fertilizante para asegurar que el suplemento de los nutrientes esenciales sea adecuado y que permita que se exprese bien el efecto del factor a estudiarse (Neil and Claudi, 1991; Hicks, *et al.*, 1997; Alesso, *et al.*, 2019). A continuación, se debe aplicar e incorporar completamente la cal en la parcela. Una parcela no debe llevar cal (testigo) y se aconseja cubrir un buen rango de dosis para asegurar la respuesta, por ejemplo, dosis de 0, 1.5, 3.0, 4.5 y 6.0 t ha⁻¹ de cal. La cantidad de cal a aplicarse en cada parcela se determina relacionando la superficie de la parcela con la superficie de una hectárea. En una parcela de 25 m² la aplicación de 2.5 kg de cal de buena calidad equivale aproximadamente a 1.0 t ha⁻¹. Partiendo de esta relación se pueden calcular las demás dosis.

Se siembra y se maneja el cultivo como se lo hace normalmente en la finca. A partir de este punto se empiezan a documentar la diferencias en germinación, crecimiento, apariencia de las plantas, etc. en cada una de las parcelas. A la cosecha se compara el rendimiento de las parcelas con cal frente al testigo y se determina el mejor tratamiento. Si se tiene acceso a un laboratorio es importante cuantificar el contenido de Al en el suelo a la cosecha para determinar cuál es la dosis más baja de cal que reduzca el contenido de Al a niveles que no causen detrimento en el crecimiento y producción del cultivo que se está probando. Esto ayuda a determinar la dosis de cal más eficiente. Si se sospecha que la dosis adecuada de cal se encuentra entre dos de los tratamientos probados, es aconsejable ajustar la recomendación probando las nuevas dosis en otro experimento ubicado en otro sitio en la finca. Se recomienda mantener el experimento en el campo por varios años sin aplicar más cal. Esto permite estudiar el efecto residual de la aplicación de cal y determinar cada cuanto tiempo se debe volver a encalar el suelo.

Sin embargo, el tiempo siempre es un factor limitante en la producción agrícola y como la acidez afecta notablemente el crecimiento de los cultivos en ocasiones es necesario obtener de manera rápida la información para controlar la acidez en suelos volcánicos. Una posibilidad es establecer un experimento en macetas en un sitio cubierto para evaluar las necesidades de cal. Se necesitan macetas plásticas que puedan contener alrededor de un kg de suelo. Los tratamientos consisten en añadir dosis crecientes de cal y se añade un tratamiento sin cal para contraste. Es preferible tener tres repeticiones de los tratamientos para mayor precisión. Se debe incubar el suelo con la cal añadida por un lapso de 30-45 días y luego se debe medir el pH y la acidez intercambiable para conocer en que dosis se controló la acidez intercambiable y ese sería la dosis de cal a aplicar al campo. Se puede también sembrar una planta indicadora para confirmar los resultados (Figura 8.21).

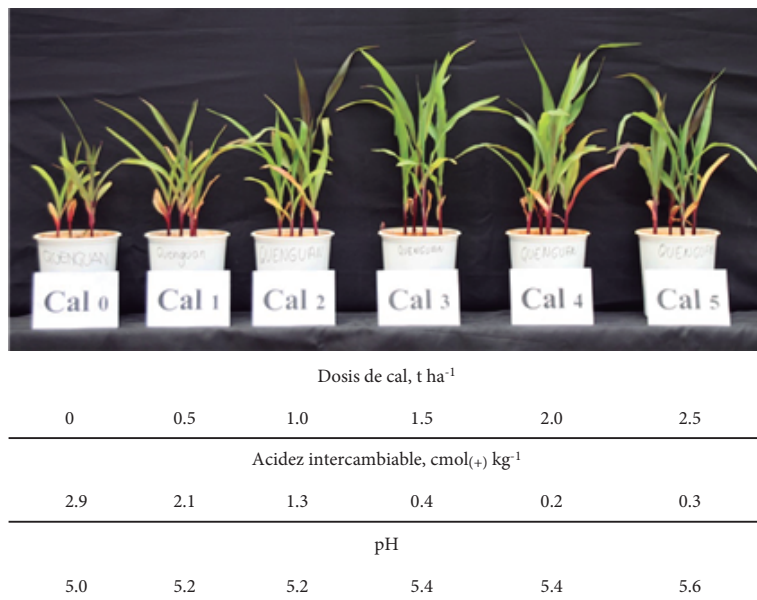


Figura 8.21. Experimento simple para determinar las necesidades de cal en suelos derivados de ceniza volcánica.

Existen áreas apreciables de suelos volcánicos en la Costa de Ecuador, ubicados al norte de la Cuenca del Río Guayas, que se han desarrollado en áreas lejanas del punto de emisión de las cenizas por efecto del acarreo por los vientos y posterior deposición. Estos suelos se encuentran en las áreas más productivas del país y están sujetos a intenso manejo. Los cultivos predominantes en esa región son palma aceitera, banano y maíz que se fertilizan con cantidades altas de N. Esta situación, junto con la alta precipitación (> 2 000 mm en cinco meses) tienden a acidificar el suelo.

En muchos casos, el problema de acidificación pasa desapercibido porque el muestreo rutinario de suelos se hace a una profundidad de 0-20 cm de la superficie. Sin embargo, los rendimientos de los cultivos perennes empiezan a reducirse sin razón aparente. Para entender el proceso y mejorar la producción de palma aceitera en sitios donde se sospechaba existen problemas de acidificación Mite, *et al.* (1999) diseñaron un experimento a largo plazo que se condujo en un Andisol clásico similar al que se presenta en la **Figura 8.22** y en el **Cuadro 8.11**. El análisis inicial del suelo se presenta en el **Cuadro 8.12**, los tratamientos evaluados en el **Cuadro 8.13**, y las cantidades de nutrientes utilizadas según el tratamiento se presentan en el **Cuadro 8.14**. Nótese que con el objetivo de evaluar el efecto de la cal en el control de la acidez se añadió carbonato de calcio al tratamiento completo, aun cuando el análisis inicial de suelo no indicaba que existía un proceso de acidificación.



Figura 8.22. Perfil de suelo Typic Hapludands (izquierda), ubicado en una superficie poco disectada de la Formación Pichilingue, en el sector Federico Intriago, cantón Valencia, provincia de Los Ríos, donde se cultiva palma africana (derecha) (MIDENA, *et al.*, 2013a).

Cuadro 8.11. Características del perfil del suelo clasificado como Typic Hapludands (MIDENA, *et al.*, 2013a).

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
A1	0-10	Color: pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; textura: franca; estructura: granular a bloques subangulares; fuerte reacción al NaF; pH: 6; materia orgánica: 2.9 %; CIC: 20 cmol kg ⁻¹ y saturación de bases: 19.0 %.
A2	10-30	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; textura de campo: franca; estructura: bloques subangulares, friable y fuerte reacción al NaF.
Bw	30 - 58	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo; textura: franca; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF; pH: 6.4 y materia orgánica: 2.2 %.
C	58-75	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en húmedo; textura de campo: franca; estructura: masiva; fuerte reacción al NaF.
2C	75-85	Color: pardo oliva (2.5Y 4/4) en húmedo; textura de campo: franco arenosa; estructura: masiva y fuerte reacción al NaF.
3Ab	85-100	Color: primario pardo oliva (2.5Y 4/3), secundario pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; textura de campo: franca; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF.
3Bwb	100-115+	Color: pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo; textura de campo: franca; estructura: bloques subangulares, friable; fuerte reacción al NaF.

Cuadro 8.12. Caracterización química del suelo al inicio del experimento de palma aceitera en 1992.

Profundidad cm	pH	NH ₄	P	Ca	Mg	K
		mg kg ⁻¹			cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	
0 - 10	6.4	28	24	10.9	1.3	0.5
10 - 25	6.8	10	7	7.7	1.0	0.4

Cuadro 8.13. Tratamientos utilizados en el experimento a largo plazo de palma aceitera.

Tratamiento	Descripción
1	Testigo
2	N
3	NPK
4	NPKSMg
5	NPKSMg + cal

Cuadro 8.14. Cantidad de nutrientes aplicadas cada año, según el tratamiento, al experimento a largo plazo en palma aceitera.

Año	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S	CaCO ₃
1992	5.0	2.1	6.0	13.9	2.2	3.6
1993	5.1	1.5	6.2	12.8	3.0	4.4
1994	5.2	1.6	6.6	17.1	2.9	4.3
1995	5.2	1.5	7.2	18.9	3.7	4.4
1996	5.3	0.6	7.2	19.2	3.9	4.7
1997	5.4	0.4	7.4	21.5	3.9	5.2
1998	5.4	0.2	8.4	21.6	4.1	4.8
1999	5.8	0.1	10.7	21.0	4.3	4.7
2000	5.8	0.1	10.7	21.0	4.3	4.7
2001	5.8	0.1	10.7	21.0	4.3	4.7
2002	5.8	0.1	10.7	21.0	4.3	4.7
2003	5.8	0.1	10.7	21.0	4.3	4.7

Las fuentes de nutrientes utilizadas fueron: Urea (46 % N), Superfosfato triple (46 % P₂O₅), Muriato de potasio (60 % K₂O), Sulfato de magnesio (25 % MgO, 20 % S), Carbonato de calcio (98 % Ca CO₃)

El rendimiento acumulado de racimos de palma cosechados después de 12 años de investigación que se presenta en la **Figura 8.23** muestra que los mejores rendimientos fueron aquellos del tratamiento con fertilización balanceada que incluye la aplicación de cal. Los rendimientos obtenidos con solamente aplicar N fueron iguales a los del testigo sugiriendo que la acidificación provocada por la nitrificación proveniente de la urea y la absorción de bases por el cultivo estaban limitando el rendimiento. Los rendimientos obtenidos con los tratamientos NPK y NPKMg son mayores que los del tratamiento con solo N, pero son todavía menores al tratamiento que incluye cal.

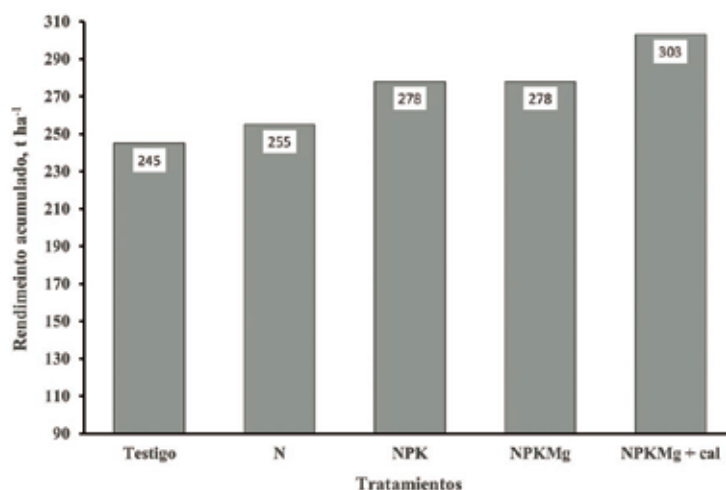


Figura 8.23. Rendimiento acumulado de racimos de palma luego de 12 años de evaluación. El Empalme, Mocache, Los Ríos (Mite, *et al.*, 1999, 2004).

En suelos de carga variable como los Andisoles de la Costa ecuatoriana, los valores de pH para el normal desarrollo de los cultivos deben estar alrededor de 5.5. Cuando los valores de pH son menores a este nivel crítico aparecen en el suelo problemas de toxicidad por presencia de elevadas cantidades Al⁺³. Sin embargo, si la muestra de suelos llevada al laboratorio se toma a una profundidad de 0-20 cm el efecto de la presencia de Al⁺³ en el reporte del análisis aparentemente desaparece,

pero si se muestrea el suelo en capas consecutivas de menor profundidad se observa claramente la presencia de problemas de acidificación del suelo. Los datos de los valores de pH del último muestreo del experimento presentados en la **Figura 8.24a** muestran que el pH del tratamiento testigo y del tratamiento NPKSMg + cal no se ha reducido y se mantiene sobre el nivel crítico en las capas de 0-5 y 5-10 cm luego de 12 años de evaluación.

El pH del suelo al inicio del experimento fue de 6.4 en los primeros 10 cm de profundidad (**Cuadro 8.12**). Por otro lado, el pH del suelo de los tratamientos donde se aplicó N durante 12 años se redujo apreciablemente llegando a tener valores menores a 4.8 en la capa de 0-5 cm en todos los tratamientos en el último año de muestreo, muy lejos del nivel crítico. Aun cuando el pH de la capa de 5-10 cm fue ligeramente más alto en todos los tratamientos que incluían N, la situación fue prácticamente la misma con respecto a la acidez. La acidificación del suelo permitió la presencia de Al^{3+} tóxico en la solución del suelo, situación que se refleja en los rendimientos de racimos frescos de palma luego de 12 años de producción. Se conoce que las raíces activas de palma son más abundantes en las capas superficiales del suelo (Corley y Tinker, 2009). La **Figura 8.24b** muestra el efecto de la aplicación de N en la paulatina acidificación del suelo a través del tiempo. Los tratamientos N y NPK alcanzaron valores de pH de alrededor de 4.5 en la capa de 0-5 cm. El tratamiento NPKSMg se acidificó menos posiblemente por el efecto de la aplicación de Mg en la absorción de Al^{3+} (Silva, *et al.*, 2001; Sancho y Molina, 2016). El testigo y el tratamiento de NPKSMg + cal mantuvieron el pH sobre el nivel crítico.

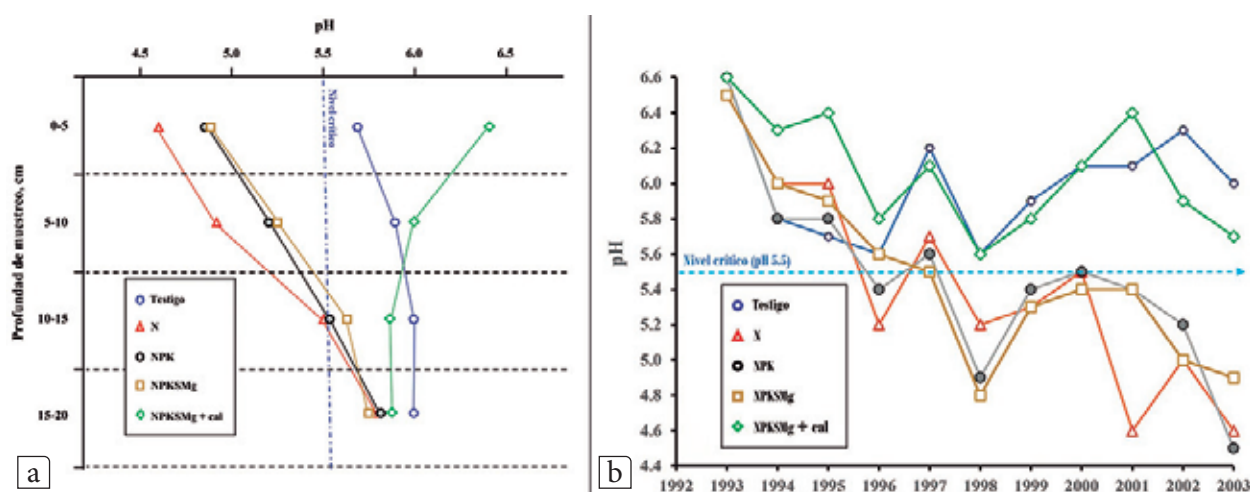


Figura 8.24. Efecto de 12 años de evaluación del comportamiento del pH del suelo bajo diferentes tratamientos de fertilización en El Empalme, Mocache, Los Ríos. a) Variación del pH en diferentes profundidades; b) Cambio del pH a través del tiempo (Mite, *et al.*, 2004).

Los suelos volcánicos de las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas y el Sureste de la provincia de Esmeraldas reciben cantidades más altas de lluvia y, por lo tanto, tienen a ser más ácidos. Muchos de estos suelos se han utilizado para la producción intensiva de piña (**Figura 8.25**).



Figura 8.25. Suelos derivados de ceniza volcánica dedicados a la producción de piña en Valle Hermoso, Santo Domingo, Santo Domingo de los Tsáchilas.

El crecimiento en el área de cultivo se fundamenta en la disponibilidad de nuevos materiales de piña, particularmente del híbrido MD2 de alto rendimiento, excelente sabor y buena aceptación en los mercados internacionales.

Es conocido que la piña se desarrolla mejor en suelos ácidos (Hossain, 2016; Sanewski, *et al.*, 2018), pero condiciones ácidas extremas pueden causar problemas aun en cultivos tolerantes como la piña. Las altas concentraciones de Al intercambiable (Al^{3+}) en suelos ácidos afecta el crecimiento radicular y el rendimiento de los cultivos (Tan, *et al.*, 1992; Batista, *et al.*, 2012). No obstante, el uso de enmiendas para controlar el problema no es completamente aceptado por agricultores y técnicos dedicados al cultivo, basándose en la premisa de que la piña necesita condiciones ácidas para desarrollarse adecuadamente.

Los suelos de la zona de expansión de la piña en Ecuador reciben abundantes precipitaciones (> 3 000 mm al año) que promueven altas tasas de lixiviación. Esta condición está relacionada principalmente con la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) generada por la acidez en suelos de carga variable. Esta condición, junto con la alta concentración de Al^{3+} en la solución del suelo, podría limitar el potencial de rendimiento de la piña MD2.

Con estos antecedentes, Mite, *et al.* (2010) condujeron un experimento para evaluar el efecto de la aplicación de materiales de encalado en el control del Al^{3+} tóxico en el suelo y documentar cuanto afecta el incremento de pH al rendimiento del cultivo de piña. Los resultados del análisis de suelos antes de iniciar el experimento de presenta en el **Cuadro 8.15**.

Cuadro 8.15. Características del suelo en el sitio experimental ubicado en Valle Hermoso, Santo Domingo, Santo Domingo de los Tsáchilas.

pH	MO	NH ₄	P	S	K	Ca	Mg	Al+H
	%	-----	mg kg ⁻¹ -----		-----	cmol(+) kg ⁻¹ -----		
4.4	5.8	19	16	24	0.3	2.0	0.3	1.5

En la **Figura 8.27** se presentan los datos de crecimiento radicular a la floración y los contenidos de Al^{3+} en el suelo, como efecto de la aplicación de las enmiendas. Se observa el efecto positivo de todas las enmiendas en las dosis de 1.5 y 3.0 t ha⁻¹ sobre el crecimiento de las raíces. Este comportamiento está directamente relacionado con la precipitación del Al^{3+} en el suelo. La **Figura 8.26** ilustra bien este efecto. Luego de que se ha eliminado el Al^{3+} como factor limitante ya no se observa respuesta en crecimiento radicular a la aplicación de dosis más altas de enmiendas y más bien se observa una reducción del crecimiento, lo que sugiere otra condición limitante para las plantas luego de que el suelo alcanza valores de pH superiores a 5.5.

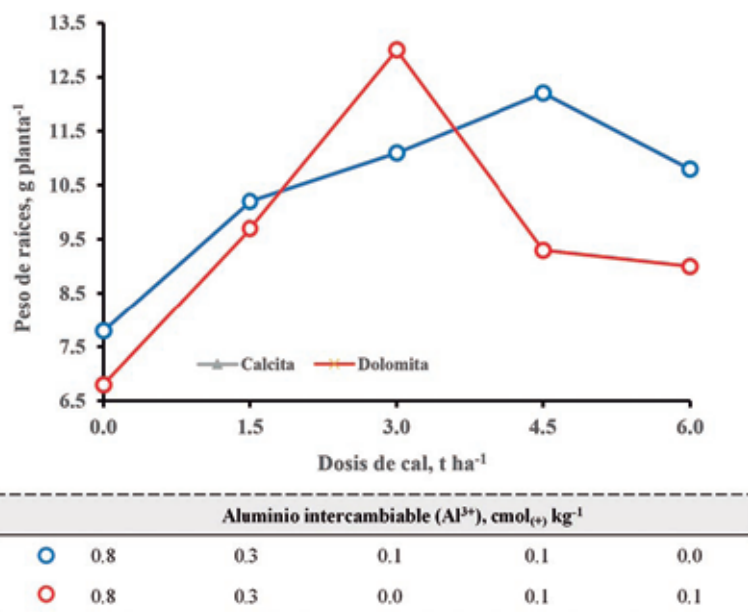


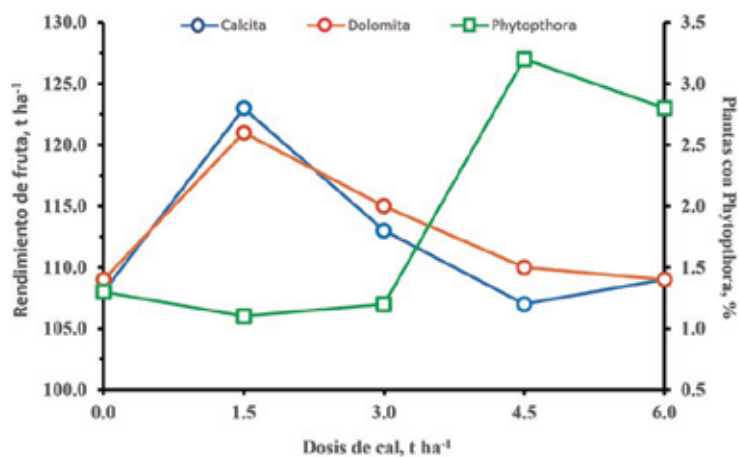
Figura 8.26. Efecto de la aplicación de calcita y dolomita en el crecimiento radicular de la piña y el contenido de Al³⁺ en el suelo. Valle Hermoso, Santo Domingo, Santo Domingo de los Tsáchilas.



Figura 8.27. Efecto de la aplicación de calcita y dolomita en el crecimiento radicular de piña MD2 cultivada en un suelo ácido derivado de ceniza volcánica. Valle Hermoso, Santo Domingo, Santo Domingo de los Tsáchilas.

El efecto de las aplicaciones de las enmiendas en el rendimiento de fruta de piña MD2 se presenta en la **Figura 8.28**. Se observa que es suficiente aplicar dosis de 1.5 t ha⁻¹ para conseguir los rendimientos más altos. Nuevamente, el efecto de la aplicación de las enmiendas sobre el contenido de Al³⁺ en el suelo explica la respuesta. Una vez que el Al³⁺ se precipita no son necesarias dosis más altas de enmiendas. Más aún, se observa que el rendimiento de fruta se reduce con la aplicación de dosis más altas de las enmiendas utilizadas. Esta reducción de rendimiento estuvo relacionada directamente con la presencia

de *Phytophthora* sp. en el cultivo, incidencia que es cada vez mayor a medida que se incrementan las dosis de las enmiendas. Esta es quizás la razón por la cual los productores de piña se resisten a la aplicación de enmiendas para mejorar el pH del suelo, considerando que un pH ácido es adecuado para el cultivo. Los datos de este estudio demuestran que en Andisoles tropicales la aplicación de enmiendas para eliminar el Al del suelo es una práctica adecuada y rentable. Sin embargo, es preciso evitar aplicar cantidades mayores de enmiendas que las necesarias para eliminar la presencia de Al^{3+} como factor limitante. Los datos de este estudio indican que dosis excesivas de enmiendas predisponen a la planta a infecciones de *Phytophthora* sp. que reducen significativamente el rendimiento.



Aluminio intercambiable (Al^{3+}), $cmol_{(+)}$ kg^{-1}					
●	0.8	0.3	0.1	0.1	0.0
●	0.8	0.3	0.0	0.1	0.1
pH (H_2O)					
●	4.4	4.9	5.3	5.6	5.8
●	4.4	5.0	5.2	5.4	5.6

Figura 8.28. La aplicación de altas dosis de enmiendas promueve la presencia de *Phytophthora* sp. en el cultivo de piña MD2 cultivada en suelos volcánicos. Valle Hermoso, Santo Domingo, Santo Domingo de los Tsáchilas.

Se conoce que los Andisoles tienen una alta capacidad tampón (resistencia al cambio de pH) que además varía según el tipo de ceniza y el manejo del suelo (Dahlgren, *et al.*, 2004; Sadzawka, *et al.*, 2006; Nanzyo and Kanno, 2018). Por esta razón, es difícil recomendar dosis generales de enmiendas para todos los sitios basándose solamente en el contenido de Al^{3+} en el suelo, como se hace en Ultisoles y Oxisoles. En el caso de los Andisoles es una buena práctica el conducir una sencilla prueba de incubación, como la que se presenta en la **Figura 8.21**, para determinar las dosis de enmiendas necesarias para un sitio en particular.

8.8. Salinidad y sodicidad de los suelos de Ecuador

Los suelos alcalinos son aquellos que se encuentran en las áreas de limitada precipitación, acumulan sales solubles y desarrollan un $\text{pH} > 7$ por la alta evapotranspiración, carencia de lavado, el mal drenaje o el nivel freático superficial. Los suelos alcalinos se clasifican en suelos salinos, calcáreos, sódicos y magnésicos, sin embargo, son los suelos salinos y los sódicos los de mayor preocupación (García, 2003). Los suelos salinos se caracterizan por tener una alta concentración de sales solubles en el perfil, condición que eleva el potencial osmótico de la solución del suelo, lo que causa estrés fisiológico en las plantas a tal punto que puede limitar totalmente la producción (White, 2013; Havlin, *et al.*, 2014). La forma más aceptada de medir la salinidad en el suelo es la conductividad eléctrica (CE) expresada en dS m^{-1} , se consideran suelos sin problemas aquellos cuya CE está en el rango de 0 a 2, ligeramente salinos de 2 a 4, moderadamente salinos de 4 a 8, severamente salinos de 8 a 16 y extremadamente salinos $> 16 \text{ dS m}^{-1}$ (Rhoades, *et al.*, 1999; FAO, 2012). El uso intenso del riego, el uso de agua subterránea de baja calidad para riego y recientemente el cambio climático son factores que incrementan las áreas salinas en el mundo (Shahid, *et al.*, 2018).

En las zonas secas y semisecas de Ecuador, que se delimitan en la **Figura 8.9**, se ha desarrollado intensa actividad agrícola soportada por riego de diversa naturaleza. Los suelos de la Costa y de la Sierra Centro y Sierra Sur que tienen potenciales problemas de salinidad son suelos dominados por arcillas de carga permanente (montmorillonita y vermiculita) que no permiten la rápida circulación del agua en el perfil del suelo, lo que promueve la acumulación de sales si no se manejan adecuadamente. Por otro lado, los suelos de áreas secas de la Sierra Norte propensos a la salinidad se encuentran, generalmente, en las zonas bajas de los valles interandinos que tienen problemas de tablas de agua superficiales que de igual forma promueven la salinización. Sin embargo, el desarrollo tecnológico ha puesto el riego al alcance de medianos y pequeños productores en todas las zonas del país. En la Sierra existen innumerables operaciones agrícolas bajo invernadero que utilizan riego. En todas estas áreas se ha observado la degradación paulatina del suelo por la introducción del riego de alta frecuencia que permite obtener altas producciones. Estas operaciones no eliminan las sales o el sodio (Na) del suelo, generando así una lenta y constante salinización a mediano o largo plazo (**Figura 8.29**). A esto se suma el desconocimiento de los problemas que genera el uso de aguas duras, no aptas para la agricultura, que acelera el proceso de salinización del suelo. Los datos de la capa de Geopedología del Geoportel del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2021) permitieron desarrollar el mapa general de la distribución de alcalinidad y salinidad de los suelos como marco general para esta discusión (**Figura 8.30**).



Figura 8.29. Efecto de la acumulación de sales en el suelo por mal manejo de riego (izquierda) y síntomas de toxicidad por salinidad en plantas de cacao (derecha). Sector El Azúcar, provincia de Santa Elena.

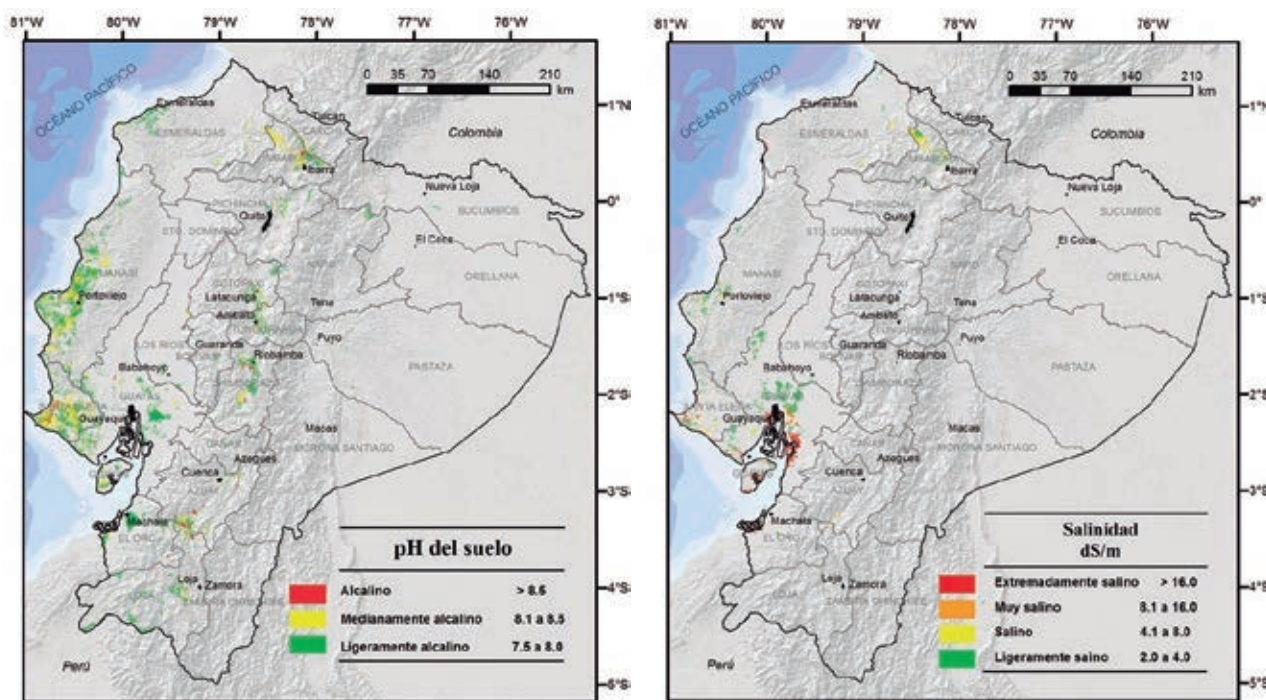


Figura 8.30. Distribución de la alcalinidad (izquierda) y la salinidad (derecha) de los suelos de Ecuador continental. Figuras procesadas a partir de la capa de Geopedología del Geoportail del IGM (IGM, 2021).

El estudio más completo para determinar la dirección del proceso de salinización de los suelos de Ecuador fue conducido por Barriga y Mite (2004) y aun cuando las áreas con problemas de salinidad podrían haberse incrementado, este estudio es un buen indicador de la tendencia general del problema en el país que, sin embargo, podría exacerbarse por los efectos del cambio climático (Mukhopadhyay, *et al.*, 2020). El estudio tomó en consideración los resultados de análisis de salinidad en muestras de suelos llevadas por productores a los laboratorios de INIAP. Se utilizaron los resultados de 412 muestras de las provincias de Manabí, Guayas y El Oro y de 1 434 muestras de las Provincias de Imbabura, Cotopaxi, Azuay y Loja. La evaluación de la información obtenida se presenta en los Cuadros 8.16 y 8.17. Se puede apreciar que el 34.2 % de las muestras tomadas en Costa presentan algún grado de salinidad, de las cuales el 20.4 % califica como afectado por salinidad ligera, 8 % media, 3.6 % alta y 2.2 % muy alta, mientras que en la Sierra el 36.4 % presentaron problemas de sales, de las cuales el 22.7 % tiene un nivel de salinidad ligera, el 9.3 % media, 2.8 % alta y 1.6 % muy alta.

Cuadro 8. 16. Grados de salinidad de las muestras de suelos de productores de las provincias de Manabí, Guayas y El Oro (Barriga y Mite, 2004).

CE dS m ⁻¹	Interpretación	Manabí		Guayas Península		Guayas Área Golfo		El Oro		% del total
		Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	
	Sin salinidad	8	50	125	83.9	84	51.2	54	65.1	
2.1 - 4.0	Ligera	2	12.5	14	9.4	48	29.3	20	24.1	20.4
4.1 - 8.0	Media	4	25	8	5.4	15	9.1	6	7.2	8
8.1 - 16.0	Alta	2	12.5	1	0.7	9	5.5	3	3.6	3.6
> 16.0	Muy Alta			1	0.7	8	4.9			2.2
Nº muestras		16	100	149	100	164	100	83	100	412

Cuadro 8. 17. Grados de salinidad de las muestras de suelos de productores de las provincias de Imbabura, Cotopaxi, Azuay y Loja (Barriga y Mite, 2004).

CE dS m ⁻¹	Interpretación	Imbabura		Cotopaxi		Azuay		Loja		% del total
		Nº	%	Nº	%	%	Nº	Nº	%	
0.0 - 2.0	Sin salinidad	104	75.4	559	58.7	72.6	239	10	71.4	63.6
2.1 - 4.0	Ligera	20	14.5	258	27.1	13.4	44	3	21.4	22.7
4.1 - 8.0	Media	6	4.3	95	10	9.7	32	1	7.2	9.3
8.1 - 16.0	Alta	5	3.6	29	2.9	1.8	6			2.8
> 16.0	Muy Alta	3	2.2	12	1.3	2.5	8			1.6
Nº muestras		138	100	953	100	100	329	14	100	1 434

Estos datos demuestran que los suelos de las zonas secas de la Costa y de la Sierra tienen problemas de salinidad de diversa magnitud que pueden afectar el comportamiento de los cultivos. Existen áreas en la Península de Santa Elena que han tenido acceso al riego en los últimos años, lo cual ha permitido que estos suelos sean muy productivos, en estas áreas cultivan productos de mucho valor para consumo interno y exportación como cacao, banano, pitahaya, mango, limón Tahití, guayaba, papaya, uva, piña, melón, cebolla y maíz que serían directamente afectados por el posible incremento de las áreas con salinidad. En las explotaciones con riego presurizado es más evidente la acumulación de sales en la superficie del suelo que se manifiesta por la presencia de eflorescencias localizadas a los costados de los goteros o aspersores, según el caso. La mayoría de los sitios propensos a acumular sales no tienen un adecuado sistema de drenaje para controlar o evitar la acumulación de las sales.

El movimiento de las sales en el perfil es un buen indicador de la tendencia a la salinidad. En la **Figura 8.31** se presentan los sitios con los mayores valores de acumulación de sales en el perfil del suelo (incluyendo la costra superficial de sales) en las provincias de la Costa. En todos los lugares se observó una disminución de los valores de CE conforme se profundiza en el suelo. Esto sugiere que el proceso de salinización es influenciado por factores que afectan la primera capa del suelo, es decir, además de la influencia primaria del clima, es el mal manejo del riego el que promueve la acumulación de sales. Además, valores de CE de la costra de salinización en San José, Cerecita y El Guabo fueron de 3.7, 4.0 y 1.7 veces más altos, respectivamente, que los de la capa de 30 a 40 cm de profundidad. Esta situación corrobora el hecho de que el mal manejo del agua estaría favoreciendo el movimiento del agua hacia la superficie y concentrando las sales en la parte superior del suelo. Parte del problema se podría solucionar implementando sistemas de riego con suficientes frecuencias que permitan mantener solamente la humedad necesaria en el suelo y así evitar el movimiento capilar del agua hacia la superficie.

En la **Figura 8.32** se presentan los sitios con los valores más altos de la salinización en el perfil del suelo en las provincias de la Sierra. En Ambuquí, Imbabura se encontraron graves problemas debido a la gran cantidad de eflorescencias granuladas y en forma de migajones, dispuestas laminarmente sobre toda la superficie del suelo y en medio de los cultivos. El análisis encontró que esta costra tenía una CE de 140.4 dS m⁻¹. Pese a que la CE fue disminuyendo con la profundidad, la salinidad fue muy alta en todos los estratos del perfil del suelo. La CE de la costra fue 2.6 veces superior que la capa de 30-40 cm. La compactación del suelo después de los 20 cm en este sitio sugiere que el problema de salinidad podría, además, estar asociado con la acumulación de Na en un proceso de sodificación, pues en estos lugares no se habían mecanizado ni pastoreado anteriormente. El Na pudo causar la dispersión de las arcillas con la consecuente disminución del espacio poroso. En Catamayo, Loja, también se encontraron formaciones de costras salinas que fueron 3.1 más altas que la capa de 30 a 40 cm de profundidad. Pese a no haberse encontrado costras en los otros lugares, éstos tuvieron valores altos de CE que sin duda restringen el crecimiento de los cultivos.

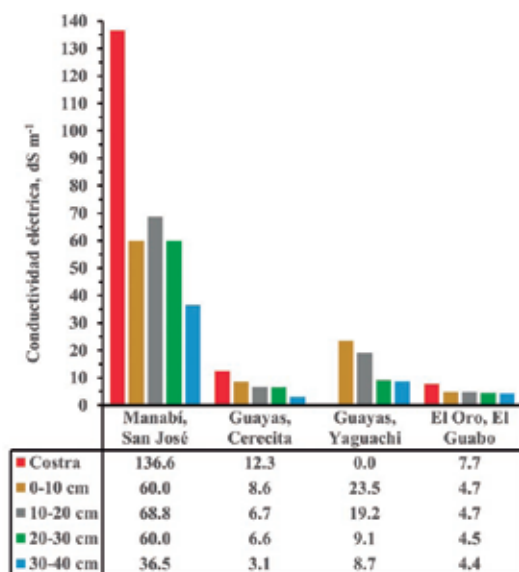


Figura 8.31. Variación de la conductividad eléctrica con respecto a la profundidad del suelo en las provincias de Manabí, Guayas y El Oro (Barriga y Mite, 2004).

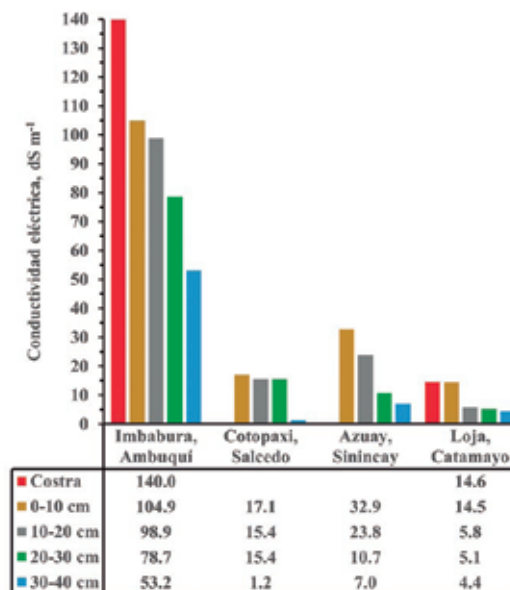


Figura 8.32. Variación de la conductividad eléctrica con respecto a la profundidad del suelo en las provincias de Imbabura, Cotopaxi, Azuay y Loja (Barriga y Mite, 2004).

El análisis estadístico de los resultados analíticos de las muestras de suelo enviadas a los laboratorios de INIAP encontró una alta dependencia entre CE y cloruros de calcio (Ca), magnesio (Mg) y Na en los suelos de Manabí, mientras que las áreas salinas de la península de Santa Elena, que tienen la influencia del agua del golfo de Guayaquil, y las áreas salinas de El Oro están relacionadas con carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros de K, Ca, Mg y Na. Esta condición es consecuencia de la dominancia de arcillas de carga permanente en el suelo, por el uso inadecuado de fertilizantes y por falta de programas de manejo que eviten o controlen la salinización.

Las áreas con tendencia a acumulación de sales en la Sierra se encuentran en las partes bajas de los valles interandinos, muchos de ellos con el nivel freático alto. En general los suelos de estas zonas son de textura gruesa. En la provincia de Imbabura la salinidad se caracteriza por la presencia de carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos de K, Ca, Mg y Na, pero en la provincia de Loja predominan las sales de Na y K. En las provincias de Cotopaxi y Azuay, además de las condiciones intrínsecas que predisponen a los fondos de los valles a la acumulación de sales, la contribución antrópica por mal manejo del suelo y el agua es la que contribuye apreciablemente a la salinidad. En general, las aguas de riego empleadas en la Sierra son de mejor calidad que las de la Costa.

La calidad del agua es factor importante en el control de la salinidad del suelo (Fipps, 2003). En la Figura 8.33 se presentan los valores más altos de CE encontrados en las aguas empleadas para regar en diferentes localidades del país. En el 62.5 % de los casos los niveles de salinidad sobrepasan los niveles permisibles. Este es el caso de las aguas utilizadas para riego en la provincia de Manabí (Motato y Pincay, 2016). El caso más extremo encontrado en el estudio de Barriga y Mite (2004) es el de San José en Manabí, donde la calidad del agua es mala y no debería utilizarse para irrigación.

Las aguas de riego que se utilizan en el Valle del río Portoviejo tienen altos valores de CE provocados por carbonatos y cloruros de Na y K que son sales que incrementan los índices de salinidad en el suelo. En cambio, en las áreas que se riegan con agua influenciada por las mareas del Golfo de Guayaquil los sulfatos y cloruros de Na y Mg son las que estarían acelerando los procesos de salinización. Las aguas con que se riega en la península de Santa Elena y en El Oro tienen cloruros de K, Ca, Mg y Na como principales sales que favorecen el aumento de los niveles de CE en esas zonas. Los cloruros de Ca, Mg y Na son los que están mayormente asociados con la salinidad del agua (Zaman, *et al.*, 2018).

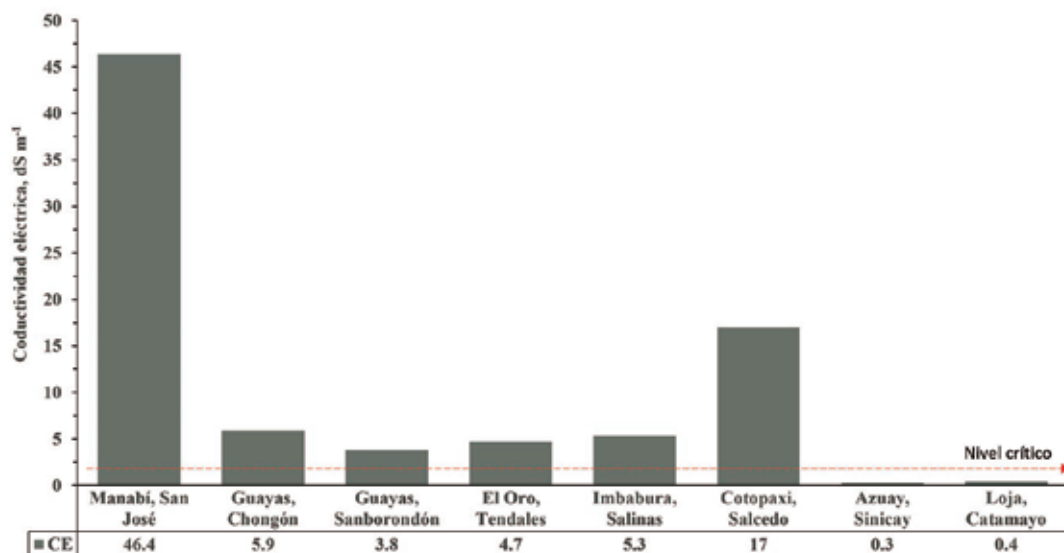


Figura 8.33. Variación de los valores más altos de conductividad eléctrica de las aguas de riego en diferentes localidades del país (Barriga y Mite, 2004).

La información obtenida por Barriga y Mite (2004) permitió hacer estimaciones de la magnitud de las áreas afectadas por salinidad en el Ecuador (**Cuadros 8.18 y 8.19**). El porcentaje total de la superficie territorial de las provincias de Manabí, Guayas y El Oro afectado por sales en la Costa es de 8.6 %, es decir, 337 613 ha, de las cuales 175 107 ha tienen afectación ligera, 59 247 ha media, 72 806 ha alta y 30 453 ha muy alta. De igual manera en la Sierra en las provincias de Imbabura, Cotopaxi, Azuay y Loja el porcentaje total de suelos afectados por sales fue solamente de 1.5 %, de esta superficie 1 804 ha tienen afectación ligera, 3 400 ha media, 9 947 ha alta y 1 765 ha muy alta.

Cuadro 8.18. Estimaciones de la superficie afectada por diversos grados de salinidad en las provincias de Manabí, Guayas y El Oro (Barriga y Mite, 2004).

Grados de afectación	Manabí		Guayas		El Oro		% del total
	ha	%	ha	%	ha	%	
Sin salinidad	1 797 339	96.40	1 436 630	81.14	486 588	84.2	87.25
Salinidad ligera	22 925	1.2	141 434	7.99	10 748	1.9	3.70
Salinidad media	7 953	0.4	34 217	1.93	17 077	3.0	1.78
Salinidad alta	1 165	0.1	66 698	3.77	4 943	0.9	1.59
Salinidad muy alta	229	0.0	4 500	0.25	25 724	4.4	1.55
Bancos de arena	192	0.0	288	0.02	213	0.0	0.02
Camaroneras	26 387	1.4	58 026	3.28	27 919	4.8	3.16
Área urbana	6 351	0.30 _c	23 767	1.34	3 673	0.6	0.75
Cuerpos de agua	2 215	0.1	5 070	0.29	1 295	0.2	0.20
Total	1 864 756	100	1 770 630	100	578 180	100	

Cuadro 8.19. Estimaciones de la superficie afectada por diversos grados de salinidad en las provincias de Imbabura, Cotopaxi, Azuay y Loja (Barriga y Mite, 2004).

Grados de afectación	Imbabura		Cotopaxi		Azuay		Loja		% del total
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	
Sin salinidad	451 500	98.0	582 779	96.9	786 432	98.2	1 095 075	99.0	98.0
Salinidad ligera			66	1.1	1 804	0.2			0.7
Salinidad media	2 424	0.5			976	0.1			0.3
Salinidad alta	415	0.1	820	0.1			8 712	0.8	0.3
Salinidad muy alta	1 250	0.3			515	0.1			0.2
Bancos de arena			50	0.0					0.0
Nieve	252	0.1	6 678	1.1					0.6
Área urbana	2 047	0.4	555	0.1	3 978	0.5	1 915	0.2	0.3
Cuerpos de agua	2 132	0.5	360	0.1	634	0.0	204	0.0	0.2
Eriales	761	0.2	3 277	0.5	6 368	0.7			0.5
Total	460 781	100	594 585	100	486 588	100	1 105 906	100.0	

A falta de nuevos estudios, los datos reportados por Barriga y Mite (2004) indican los lugares del país donde la salinidad es factor limitante para los cultivos y son herramientas de apoyo para definir las tendencias de crecimiento de áreas con acumulación de sales por el efecto previsible de la expansión de las áreas de riego en la Costa y en la Sierra que se podrían exacerbar a causa del cambio climático (Mukhopadhyay, *et al.*, 2020). Sin embargo, se han desarrollado varios estudios con las herramientas tecnológicas disponibles en la actualidad que ha evaluado a nivel local los efectos de la salinidad en los cultivos, particularmente en el cultivo de arroz, en la provincia del Guayas (Pozo, *et al.*, 2010; Pérez, 2019; Manrique, 2021).

La salinización afecta directamente la producción de los cultivos y degrada el suelo con impactos socioeconómicos y ambientales de graves consecuencias. Sin embargo, no existen políticas estatales de preservación del suelo, particularmente en términos de control de la salinidad en las regiones semiáridas del país que se encuentren bajo riego. El trabajo conjunto de instituciones estatales y privadas lograría establecer políticas de preservación y recuperación que garanticen la calidad del suelo y los cultivos.

Un procedimiento eficaz, práctico y económico para controlar la salinidad se basa en el lavado de las sales del perfil del suelo. Sin embargo, el éxito de este método de manejo de las sales depende del drenaje, ya que el procedimiento no funciona si no existe un sistema que evacue las sales de la zona radicular. El procedimiento básico consiste en la dilución y movimiento de las sales para llevarlas fuera del alcance de las raíces. El procedimiento es específico para cada caso y depende de la textura y estructura del suelo, grado de salinidad, topografía del sitio, disponibilidad de agua para el lavado y sistema de riego a emplearse. La cantidad de agua que debe pasar por el perfil para lavar las sales depende de tres factores: 1) la salinidad inicial, 2) la técnica de aplicación del agua, y 3) la textura del suelo. La técnica de lavado más corriente es la inundación permanente o intermitente del lote, pero también se puede utilizar riego por aspersión cuando este sistema permite utilizar volúmenes grandes de agua (García, 2006; Abou-Baker and El-Dardiry, 2015).

8.9. Capacidad de intercambio catiónico de los suelos de Ecuador

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la medida de la capacidad del suelo para retener cationes, es decir, mide la cantidad de cargas negativas en las arcillas y materia orgánica del suelo (fase de intercambio). Una buena parte de los nutrientes esenciales son cationes que se retienen en la fase de intercambio para poder salir a la solución del suelo y ser absorbidos por las raíces de las plantas. Por

esta razón, la CIC refleja bien la capacidad productiva y la capacidad de retener contaminantes del suelo (Camberato, 2007).

En Ecuador, los suelos de carga permanente (dominados por arcillas de tipo 2:1 como montmorillonita y vermiculita) tienen mayor CIC que los suelos derivados de cenizas volcánicas de carga variable (dominados por arcilla de rango corto como alofana, imogolita y complejos humus aluminio) y mucho más CIC que los suelos rojos viejos también de carga variable (dominados por caolinita y sesquióxidos de Fe y Al). La distribución general de estos suelos en el territorio nacional se presenta en la **Figura 8.34**.

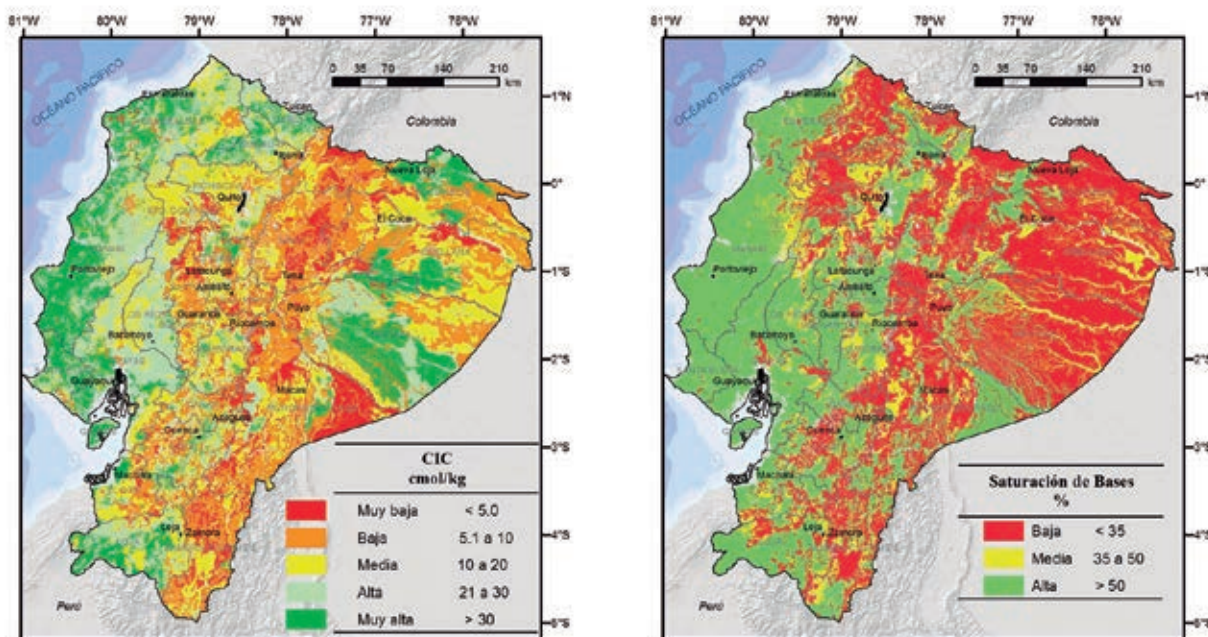


Figura 8.34. Distribución de la CIC determinada con acetato de amonio (izquierda) y de saturación de bases (derecha) en los suelos de Ecuador continental. Procesado a partir de la capa de Geopedología del Geoportal del IGM (IGM, 2021).

El método de determinación de la CIC en el laboratorio puede causar confusiones por el efecto de la solución extractora en la carga superficial de los coloides de carga variable. Como se conoce, los suelos dominados por arcillas de carga permanente no cambian la CIC con el cambio de pH, mientras que en los suelos de carga variable la CIC se incrementa con el incremento en pH. En Ecuador, el método más popular para determinar la CIC utiliza acetato de amonio (NH_4OAc) 1M a pH 7.0. Existen también otros métodos que utilizan soluciones amortiguadas a pH 7.0 y 8.2. Estos métodos funcionan bien en suelos dominados por arcillas de carga permanente y determinan adecuadamente la CIC. Sin embargo, cuando se utilizan en suelos dominados por arcillas de carga variable los resultados no son aceptables. Si el pH del suelo dominado por arcillas de carga variable es menor que 7.0, el pH de la solución extractora amortiguada a pH 7.0 u 8.2 crea artificialmente carga adicional en la superficie de los coloides produciendo datos que no representan la real CIC del suelo en condiciones de campo (Uehara and Gillman, 1980).

Se han evaluado métodos diferentes para la determinación de la CIC en suelos de carga variable. Estos métodos miden la capacidad del suelo de adsorber cationes de una solución acuosa a un pH y fuerza iónica similares a aquellos que el suelo tiene en sus condiciones naturales en el campo. Uno de estos métodos satura el suelo con una solución no amortiguada (que no cambia el pH del medio) de un catión divalente como el Ba (BaCl_2) (Hendershot and Duquette, 1986; Gillman, 2007). Estos métodos logran determinar la real CIC del suelo. Los resultados de un experimento de campo conducido por Alvarado (2004) en un Melanudand del cantón Mejía, provincia de Pichincha (**Cuadro 8.20**) demuestran claramente el efecto del tipo de solución extractora en el resultado de la determinación de la CIC. Este suelo se encaló en los años 1986, 1992 y 1999 y se muestreo a una

profundidad de 0-20 cm en el año 2001. Los datos indican el efecto significativo del encalado sobre el cambio del pH y el incremento consecuente de la CIC en suelos de carga variable que se detectó únicamente cuando se utilizó el método que determina la CIC con la solución no amortiguada. Adicionalmente, el experimento de incubación conducido en condiciones controladas por Mite, *et al.* (2010) en un Hapludand del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos demuestra el comportamiento de la CIC de un suelo volcánico donde la adición de cal incrementa el pH, pero además demuestra el efecto de la determinación de la CIC con acetato de amonio a pH 8.2 en la generación artificial de carga en un suelo de carga variable (**Cuadro 8.21**).

Cuadro 8.20. Efecto del encalado en campo de un Melanudand del cantón Mejía, provincia de Pichincha, sobre el pH y la CIC del suelo muestreado de 0 - 20 cm de profundidad (Adaptado de Alvarado, 2004).

Dosis	pH	Al + H	CIC con cloruro de bario	CIC con acetato de amonio
$t\ ha^{-1}$			----- $cmol_{(+)}\ kg^{-1}$ -----	
0	5.5 d*	2.05 a	6.74 c	30.4 a
3	5.6 d	1.33 b	7.22 bc	31.7 a
6	5.8 c	0.65 c	9.85 b	30.2 a
12	6.5 b	0.29 d	14.04 a	30.5 a
18	6.9 a	0.29 d	16.09 a	31.6 a

* Valores de las medias en cada columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes al 95 % de intervalo de confianza

Cuadro 8.21. Comparación de la determinación de la CIC con acetato de amonio y cloruro de bario en un Andisol del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos, incubado por 30 días con diferentes enmiendas.

Dosis	CIC con cloruro de bario		CIC con acetato de amonio	
	Calcita	Dolomita	Calcita	Dolomita
$t\ ha^{-1}$	----- $cmol_{(+)}\ kg^{-1}$ -----		----- $cmol_{(+)}\ kg^{-1}$ -----	
0	7.03	7.61	24.02	23.42
1.5	7.66	7.45	23.72	24.02
3.0	8.36	7.56	22.83	24.22
4.5	9.21	9.43	25.81	24.91
6.0	9.75	9.71	23.62	24.61
7.5	11.64	10.85	23.52	25.81
9.0	12.44	11.23	23.72	24.61
10.5	13.61	12.06	24.12	25.41

La determinación de la CIC con la sal indiferente ($BaCl_2$) permite evaluar la real capacidad de retener cationes del suelo en estudio y permite observar claramente el efecto de los carbonatos en la generación de carga en la superficie de los coloides. El encalado de los suelos de carga variable no produce un cambio radical en pH y los iones OH^- , producto de la reacción de la cal, deprotonan los grupos funcionales en la superficie reactiva de los coloides creando carga negativa (Uehara and Gillman, 1981; Sollins, *et al.*, 1988). De igual forma, se observa que la determinación de la CIC con acetato de amonio sobrestima la carga en la superficie de los coloides de este tipo de suelos y por esta razón pierde la sensibilidad para evaluar la generación de carga por los carbonatos. Uno de los beneficios del encalado en los suelos de carga variable es el incremento de la CIC que permite una mejor retención de cationes, factor importante en suelos sujetos a alta lixiviación. Por otro lado, los laboratorios en Ecuador no contemplan el análisis rutinario de CIC para las muestras de agricultores y este análisis solo se realiza bajo pedido y es generalmente costoso, sin embargo, cuando se lo solicita es importante saber con qué tipo de suelos se está trabajando en la operación agrícola para obtener un dato real de la capacidad de

retener cationes del suelo. Si el análisis se realiza con acetato de amonio, u otra solución tamponada, y el suelo es dominado por arcillas de carga variable, el resultado sobreestimaré la capacidad del suelo de almacenar cationes y complicará el manejo de la fertilización. La CIC es también un parámetro utilizado en programas de control de contaminantes considerando que el suelo puede atrapar cationes nocivos en su fase de intercambio. Aquí es también necesario conocer el tipo de arcilla dominante para ordenar el procedimiento adecuado de determinación de CIC.

8.10. Comportamiento de fósforo en los suelos de Ecuador

El fósforo (P) es un elemento esencial para la vida, parte del ADN, imprescindible como proveedor de energía en las reacciones biológicas y parte integral de la membrana celular, es decir, es parte esencial de plantas animales y microorganismos. Por esta razón no sorprende que la disponibilidad de P en el suelo sea importante en regular la estructura y función de los ecosistemas (Elser, 2012). El P no tiene sustituto para la producción de cultivos, sin embargo, el inadecuado uso de las fuentes de P ha llevado a la eutroficación de los cuerpos de agua. Además, la progresiva necesidad de P para producir alimentos para una población creciente hace previsible una crisis por carencia de fertilizantes portadores de P al verse cercano el agotamiento de las minas de fosfato, materia prima para la fabricación de fertilizantes (Scholz, *et al.*, 2013). La producción agrícola tiene que enfrentar estos nuevos retos utilizando eficientemente los fertilizantes portadores de P y buscando nuevas fuentes del nutriente que pueden provenir del reciclamiento de materiales de desecho como las aguas residuales (Ashley, *et al.*, 2011; Cordell and White, 2013).

Pese a su abundancia en la naturaleza, el P es un nutriente de baja biodisponibilidad debido a que las plantas solamente pueden absorber del suelo formas solubles de fosfatos inorgánicos denominados ortofosfatos (HPO_4^- y H_2PO_4^-) que se encuentran en la solución del suelo en concentraciones muy bajas (micromoles). Por esta razón, la absorción de P por las raíces debe hacerse mediante transportadores activos de alta afinidad que muevan el P inorgánico a través de la membrana celular de la epidermis de las raíces venciendo la gradiente de concentraciones entre el plasma celular y la solución del suelo (Ashley, *et al.*, 2011; Shen, *et al.*, 2011).

La química del P en el suelo es compleja, pero se puede describir como reacciones que se inician con la adición de compuestos solubles de P, como el fosfato monocálcico del superfosfato, que terminan en el suelo en forma de iones fosfato HPO_4^- y H_2PO_4^- , dependiendo del pH. Estas formas solubles de P son absorbidas por las raíces de las plantas, pero también desaparecen rápidamente de la solución del suelo al pasar por reacciones de precipitación o de adsorción que forman compuestos poco solubles que sacan el fosfato del alcance de las plantas. El tipo y proporción de estas reacciones depende de la naturaleza de las arcillas en el suelo (Johnston, 2000).

En las reacciones de precipitación, los iones fosfato reaccionan con los metales en los suelos formando compuestos insolubles. En suelos de pH ácido, el H_2PO_4^- forma fosfatos insolubles de Al, Fe y manganeso (Mn), pero en suelos alcalinos las reacciones del HPO_4^- llevan a la formación de fosfatos de Ca insolubles de diversa composición (Johnston, 2000; Shen, *et al.*, 2011). En Ecuador, estas reacciones ocurren principalmente en suelos de carga permanente como aquellos dominados por arcillas de tipo 2:1 de la Costa y la Sierra Centro y Sierra Sur.

Las reacciones de adsorción (fijación) ocurren con preferencia en los suelos de carga variable. En estas reacciones, los iones fosfato reacciona con los metales (principalmente Fe y Al) presentes en la estructura de coloides como la caolinita y los sesquióxidos. Sin embargo, estas reacciones de alta energía también ocurren en las superficies de arcillas provenientes de la meteorización de la ceniza volcánica (Johnston, 2000; Qafoku, *et al.*, 2004). En Ecuador, estas reacciones ocurren preferentemente en los suelos rojos viejos de la Amazonía, Noreste de Esmeraldas y los parches de suelos rojos de la Sierra Centro y Sierra Sur, así como en los suelos derivados de ceniza volcánica.

Si bien de poca solubilidad, los compuestos de P formados por las reacciones de precipitación pueden regresar a la solución del suelo como fosfatos solubles que nutren la planta. Si el contenido total de P en el suelo es alto, la probabilidad de que exista una buena disponibilidad de P soluble en la solución del suelo es también alta (Johnston, 2000; Havlin, *et al.*, 2014). Por esta razón, en los suelos de carga permanente de Ecuador son menores las limitaciones de P para la nutrición de los cultivos.

Por otro lado, en los suelos desilificados, rojos y viejos de Ecuador existen reacciones de fijación que sacan el P de la solución del suelo y que no regresaran en forma soluble en mucho tiempo. Sin embargo, es quizá en los suelos derivados de ceniza volcánica donde estas reacciones de fijación toman relevancia (Uehara and Gillman, 1981; Qafoku, *et al.*, 2004).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) cubren una apreciable área de Ecuador. La fracción arcilla de estos suelos está dominada por alofana e imogolita (minerales amorfos de rango corto) que provienen de la meteorización de los materiales piroclásticos producto de recientes deposiciones volcánicas (Dahlgren, *et al.*, 2004). Investigación conducida en los últimos años ha demostrado que los complejos humus-Al juegan también un significativo papel en el comportamiento de los Andisoles (Takahashi and Dahlgren, 2016).

Una de las características más importantes de los Andisoles es su capacidad para fijar (inmovilizar) P en la superficie de los minerales amorfos. Esta es la principal limitante química de los Andisoles. Aparentemente, la capacidad de fijación de P de los Andisoles varía con el tipo de arcilla presente y esto a su vez cambia el efecto residual de las aplicaciones de fosfato. En ciertos cultivos, los estudios de calibración no han logrado correlacionar adecuadamente el contenido de P en el suelo con el rendimiento y las recomendaciones de fertilización no son adecuadas.

Inicialmente se consideró que la fijación de P en los Andisoles ocurría solamente en las superficies activas de la alofana y la imogolita. Los mecanismos de fijación de P en la alofana e imogolita incluyen procesos como quemiadsorción, desplazamiento de Si estructural y precipitación. Sin embargo, se ha reconocido la importancia de los complejos humus-Al en este proceso. La fracción humus en Andisoles forma fácilmente complejos con metales como el Al. El carbono (C) atrapado en estos complejos es inactivo y deja de ser parte del C activo de la fracción orgánica. De esta forma, los grupos hidroxilo combinados con el Al acomplejado entran en reacciones de intercambio de ligandos con HPO_4^- y H_2PO_4^- como se observa en la **Figura 8.35**, fijando fuertemente el P aplicado como fertilizante. Además, el fuerte acomplejamiento del Al con el humus limita la posibilidad de coprecipitación de Al con Si liberados de la descomposición de la ceniza volcánica y esto a su vez limita también la formación de alofana. Estos procesos se han documentado en Andisoles de Japón, Colombia y Ecuador (Benavides y Gonzales, 1988; Inoue, 1988; Sollins, 1991; Zehetner, *et al.*, 2003; Takahashi and Dahlgren, 2016).

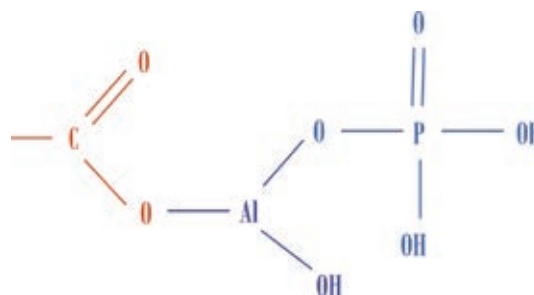


Figura 8.35. Representación esquemática de la fijación de fósforo en los complejos humus-Al (Sollins, 1991).

La acumulación de humus es mayor en suelos volcánicos localizados a mayor altitud (> 2 500 m s. n. m.). Evidencia indirecta obtenida en Andisoles de Ecuador permite concluir que la fijación de P estaría estrechamente relacionada con el contenido de C en el suelo (complejos humus-Al). Indirectamente, esto también indicaría cuales minerales arcillosos se formaron a partir de la ceniza volcánica en diferentes condiciones, así como la intensidad de la fijación de P. Aparentemente los suelos alofánicos tienden a fijar menos P.

Los datos del experimento exploratorio de invernadero conducido por Espinosa, *et al.* (1987) y diseñado para estudiar la relación entre el C total y la fijación de P se presentan en el **Cuadro 8.22**. Se sembró sorgo en macetas que contenían suelo tratado con diferentes dosis de P. Después de la

cosecha, se caracterizó la retención de P en los suelos de cada una de las macetas. Los datos de este experimento sugieren que de hecho existe una estrecha relación entre el C total y la fijación de P. Se observa también que la retención de P no se reduce con las altas dosis de P aplicadas a este Melanudand que tiene un alto contenido de C total. Se esperaba que las altas dosis de P podrían satisfacer o al menos reducir la capacidad de fijación de este suelo.

Los datos de un estudio de pedogénesis de un transecto del volcán Cotacachi en Ecuador (**Cuadro 8.23**) confirman el hecho de que la fijación de P está asociada directamente con la presencia de C inactivo en el suelo (Zehetner, *et al.*, 2003). Se encontraron diferencias altitudinales con respecto a la formación pedogenética de los minerales del suelo. Se determinó que la fracción arcilla de las zonas situadas a elevaciones superiores a 3 200 m s. n. m. estaban dominadas complejos humus-Al, las zonas entre 3 200 y 2 700 m s. n. m. por complejos humus-Al y alofana y que bajo 2 700 m s. n. m. no existe presencia de complejos humus-Al. Diferencias en la zonificación se pueden presentar por efecto de las cambiantes condiciones de humedad y temperatura en las diferentes áreas desarrolladas sobre ceniza volcánica de la Sierra Norte de Ecuador.

Cuadro 8.22. Efecto de las dosis de fósforo en la subsecuente retención de este elemento en dos Andisoles de Ecuador con diferente contenido de carbono (Espinosa, *et al.*, 1987).

Dosis de P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	----- Carbono Total -----		P fijado después de la 1 ^{era} cosecha	
	Melanudand	Vitrand	Melanudand	Vitrand
	----- % -----		-----	
0	5.0	1.2	42	14
150	5.3	1.1	40	11
300	4.9	1.1	40	8
450	5.1	1.1	42	8

Cuadro 8.23. Contenidos de carbono, aluminio asociado con el carbono y retención de fósforo en un transecto de suelos derivados de ceniza volcánica alrededor del volcán Cotacachi, Ecuador (Zehetner, *et al.*, 2003).

Horizonte ¹	Altitud	Carbono ²	Aluminio asociado al carbono ³	Fijación de Fósforo ⁴
	m s.n.m.	(%)	g kg ⁻¹	(%)
Pedón 1	4 050			
A		7.5	7.0	90
AB		3.8	4.4	89
Pedón 2	3 900			
A1		10.3	10.1	91
A2		4.1	4.9	87
Pedón 3	3 400			
A		7.7	7.6	88
AC		2.4	4.0	79
Pedón 4	3 000			
A		3.4	3.6	61
Pedón 5	2 950			
A1		3.6	3.0	46
A2		3.0	3.4	46
Pedón 6	3 060			
A		6.4	5.6	74
Pedón 7	2 900			
A1		3.1	3.0	52
A2		2.2	2.4	48
Pedón 8	2 740			
Ap		2.3	1.7	26
A		2.1	2.6	38
Pedón 9	2 570			
Ap		0.9	0.2	4
A1		0.5	0.2	4
Pedón 10	2 560			
A		0.3	0.2	7
Pedón 11	2639			
A		0.6	0.3	6
Pedón 12	2 410			
A1		0.4	0.1	6
A2		0.6	0.1	6

¹ Horizontes de diferente profundidad.

² Carbono total determinado por combustión seca (Tabatabai and Bremner, 1972).

³ Aluminio asociado con la materia orgánica extraído con pirofosfato de sodio a pH 10 (Wada, 1989).

⁴ Diferencia después de 16 h de agitación con una solución de 1000 mg L⁻¹ de P (Soil Survey Staff, 2006).

Parecería que el contenido de C total en Andisoles podría ser un buen parámetro para determinar la capacidad de fijación de P de un suelo. En la **Figura 8.36** se presenta la correlación entre el P fijado y el contenido de C total de 42 Andisoles de Ecuador. Un estudio en Andisoles en Chile (**Figura 8.37**) demuestra la misma tendencia al encontrar una buena correlación entre el P retenido por la fracción orgánica y el contenido C total en el suelo (Briceño, *et al.*, 2004). Experimentación de campo deberá confirmar si esta relación se mantiene y cómo estos parámetros se podrían relacionar con el diagnóstico

del contenido de P en el suelo y con las recomendaciones de fertilización. Esta relación indirecta entre el carbono del suelo y la capacidad de retención de P se atribuye al Al presente en los complejos humus-Al y alofanas (Hashimoto, *et al.*, 2012; Díaz y Sadeghian, 2018).

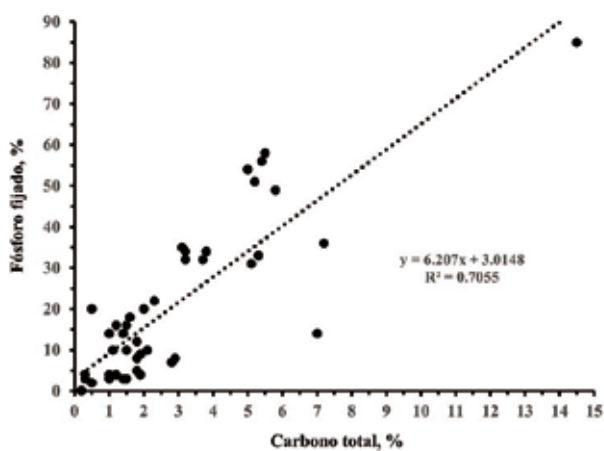


Figura 8.36. Correlación entre el contenido de carbono total y el porcentaje de fijación de fósforo en Andisoles de Ecuador (Espinosa, *et al.*, 1987).

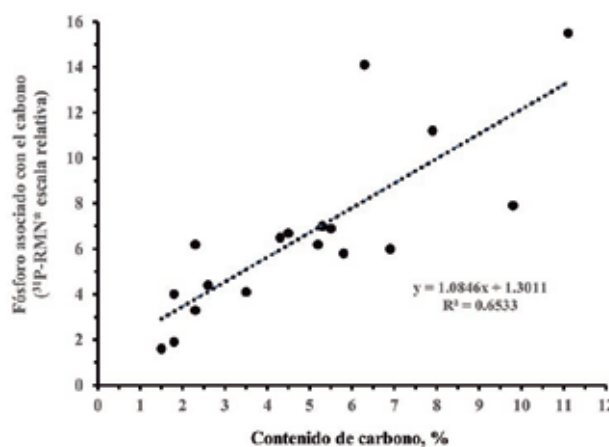


Figura 8.37. Correlación entre el contenido de carbono total y el porcentaje de fijación de fósforo en Andisoles de Chile (Briceño, *et al.*, 2004).

Las recomendaciones de fertilización para la Sierra de Ecuador se basaron en investigación preliminar que determinó que el nivel crítico de la concentración de P en suelos de la Sierra era de 10 mg kg^{-1} (extraído con NaHCO_3) para todos los cultivos (Cáceres, 1974; Padilla, 1979). Este nivel crítico general no reconocía el efecto del tipo de suelo y del cultivo (Havlin, *et al.*, 2014). Los experimentos de campo conducidos en Andisoles de la Sierra Norte de Ecuador (Córdova, *et al.*, 1996; INIAP, 1996, 2006) evaluaron la respuesta a la aplicación de P en el cultivo de papa en 12 sitios en la Sierra Norte de Ecuador. Los tratamientos de los experimentos estuvieron en el campo, en las mismas parcelas, por tres ciclos consecutivos y permitieron definir un nivel crítico particular para papa cultivada en suelos derivados de ceniza volcánica, así como el efecto residual de la aplicación de P.

Los resultados obtenidos en todos los sitios evaluados fueron bastante similares y como un ejemplo representativo del comportamiento del cultivo de papa a las dosis crecientes de P se presentan los datos del sitio El Chaupi, Mejía Pichincha (**Cuadro 8.24** y **Figuras 8.38** y **8.39**). Estos datos indican que los rendimientos obtenidos en la parcela testigo son bajos aun cuando el contenido de P en el suelo, extraído con NaHCO_3 , sería alto (28 mg kg^{-1}) con respecto al nivel crítico general que se suponía era de 10 mg kg^{-1} . Por otro lado, existió una apreciable respuesta en rendimientos a las dosis crecientes de P en todos los ciclos, indicando que el efecto residual de P es bajo, aun cuando el análisis de suelo no reflejaba este hecho. El contenido de P se incrementó a 38 y 59 mg kg^{-1} en las parcelas que recibieron una aplicación de 300 y $450 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente. Sin embargo, el rendimiento de tubérculos en el tercer ciclo, en las mismas parcelas, pero sin aplicación de P, fue de nuevo bajo (**Cuadro 8.24**). La misma tendencia se observa tanto en las aplicaciones bajas como en las aplicaciones altas de P. Se sospecha que existiría la misma tendencia si se hubiesen utilizado otros extractantes en el análisis de P en el suelo.

Cuadro 8.24. Efecto residual de P en el rendimiento de papa y la relación con el contenido de P según el análisis de suelo en un Udands de la Sierra Alta de Ecuador. El Chaupi, Mejía Pichicha (Córdova, *et al.*, 1996).

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		P* al final
P ₂ O ₅	Rendimiento	P ₂ O ₅	Rendimiento	P ₂ O ₅	Rendimiento	
kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
0		0	6.04	0	6.37	28
0	3.09	0	5.90	300	32.39	41
0		300	39.34	300	31.19	46
150		0	9.90	0	8.33	28
150	16.46	150	32.65	0	11.32	32
150		150	35.44	150	34.45	40
300		0	15.92	0	7.90	27
300	27.60	300	36.54	0	12.44	38
300		300	39.86	300	32.63	64
450		0	18.84	0	13.21	34
450	27.74	450	42.55	0	24.09	59
450		450	45.12	450	28.28	89

* Contenido de P en el suelo después del tercer ciclo, P extraído con NaHCO₃ (Olsen)



Figura 8.38. Respuesta a la aplicación de dosis de fósforo en un Andisol de El Chaupi, Mejía, Pichincha (Córdova, *et al.*, 1996).



Figura 8.39. Respuesta a la aplicación de dosis de fósforo en un Andisol de El Chaupi, Mejía, Pichincha. Rendimiento al final de los tres ciclos (**Cuadro 8.24**) (Córdova, *et al.*, 1996).

Los datos también sugieren que aun aplicaciones de dosis muy altas de P no satisfacen la capacidad de fijación de este suelo y el efecto residual es bajo y para obtener un adecuado rendimiento de tubérculos en este Andisol sería necesaria la aplicación de P en cada ciclo. Sin embargo, la calibración y correlación entre el rendimiento de papa y el contenido de P en el suelo (extraído con solución Olsen modificada) utilizando los datos de todos los sitios de evaluación, con el ajuste previsto en el método de modelos discontinuos (Nelson, 1999; Mashayekhi, *et al.*, 2014), determinaron que el nivel crítico de P para papa en Andisoles es de 42 mg kg^{-1} (**Figura 8.40**). Este trabajo de correlación permite utilizar el análisis de suelos como una adecuada herramienta para diseñar recomendaciones de fertilización en papa en Andisoles y están incorporados en la nueva Guía de Recomendaciones de Fertilización del INIAP (Alvarado, *et al.*, 2009).

Los suelos utilizados en los experimentos descritos anteriormente (la mayoría Udands) son típicos de las áreas productoras de papas de la Sierra Norte de Ecuador. El contenido de carbono en estos suelos varía de 3 a 5 % y se considera que los complejos humus-Al serían los componentes dominantes en la fracción arcilla. Es difícil distinguir entre suelos dominados por alofana, imogolita o complejos humus-Al, y hasta hace poco, los suelos conteniendo estos minerales estaban agrupados en el suborden Andepts en el orden de los Inceptisoles. A partir de 1988 se creó un nuevo orden de suelos denominado Andisol para agrupar todos los suelos derivados de materiales volcánicos (ICOMAND, 1986; Parfitt and Clayden, 1991). Este nuevo agrupamiento dentro de la taxonomía de suelo permite la separación de los suelos dominados por complejos humus-Al de los suelos dominados por alofana e imogolita. Este hecho podría permitir una mejor caracterización de la fijación de P en suelos derivados de ceniza volcánica.

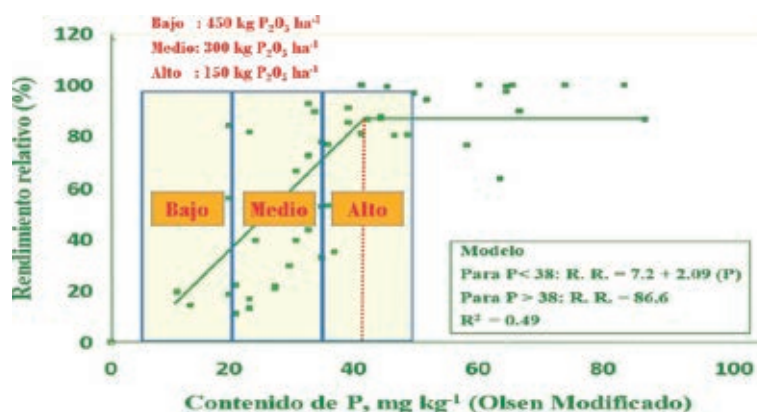


Figura 8.40. Calibración del análisis de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica de la Sierra Norte de Ecuador utilizando el método de modelos discontinuos (Córdova, *et al.*, 1996).

Por otro lado, las recomendaciones de P para papa en la Sierra Centro y en la Sierra Sur de Ecuador son significativamente menores a las que se utilizan en los suelos volcánicos de la Sierra Norte (Lucero, 2011), debido a que la mayoría de los suelos donde se cultiva papa no son Andisoles.

Experimentos de largo plazo han demostrado que los niveles críticos de P, considerados adecuados para un cultivo en un tipo particular de suelo, cambian cuando se siembra otro cultivo en la rotación (Johnston, 2009). Observaciones similares se han reportado en suelos volcánicos de Ecuador. Como se discutió anteriormente, el efecto residual de las aplicaciones de P en el cultivo de la papa es bajo en este tipo de suelos, pero lo contrario ocurre con mezclas forrajeras sembradas en el mismo tipo de suelos. Los datos del Cuadro 8.25 muestran la falta de respuesta a la aplicación de P en el cultivo de pastos, cuando el contenido de P en el suelo es alto (35 mg kg⁻¹ extraídos con NaHCO₃), observándose además un buen efecto residual. Este comportamiento sugiere que existen diferentes niveles críticos de P para diferentes cultivos sembrados en el mismo Andisol.

Cuadro 8.25. Efecto de la aplicación y de la residualidad de P en el rendimiento de materia seca de una mezcla forrajera en un Udands de la Sierra Norte de Ecuador (INIAP, 1996).

Dosis de P ₂ O ₅	Primera Cosecha	Cuarta Cosecha
kg ha ⁻¹	----- t ha ⁻¹ -----	
0	3.6	3.4
100	3.8	3.7
200	3.3	4.3

- P aplicado antes de la siembra de la mezcla forrajera
 - Contenido inicial de P = 35 mg kg⁻¹ extraído con NaHCO₃

La violenta actividad volcánica ocurrida en el pasado envió cenizas a la atmósfera, las cuales se movieron largas distancias antes de depositarse en la superficie. Esta es la razón por la cual existen suelos derivados de cenizas volcánicas a considerables distancias del punto de origen. Algunos de estos suelos se han desarrollado en ambientes de alta humedad y temperatura localizados a bajas altitudes. Se sospecha que en estos suelos la cantidad de alofana e imogolita es alta, pero el color del suelo continúa siendo oscuro y en la clasificación taxonómica antigua estaban clasificados como Dystrandeps, exactamente igual a los Andisoles de mayor altura que supuestamente tienen mayor contenido de complejos humus-Al. En el caso de estos suelos desarrollados en diferente ambiente, el nivel crítico de 12 mg kg⁻¹ de P en maíz ubica

razonablemente bien la respuesta a la aplicación de P. Un ejemplo se presenta en el **Cuadro 8.26**. Sin embargo, son necesarios estudios de calibración para afinar este nivel crítico, particularmente con los nuevos híbridos de maíz de alto rendimiento.

Cuadro 8.26. Respuesta del maíz a la aplicación de P en un Udands de El Empalme, Mocache, Los Ríos (INIAP, 1990).

Dosis de P ₂ O ₅	Rendimiento
kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹
0	7.5
40	8.4
80	8.3
120	8.1

- Contenido inicial de P = 12 mg kg⁻¹ extraído con NaHCO₃

8.11. Referencias bibliográficas

- Abou-Baker, N. and E. El-Dardiry. 2015. Integrated Management of Salt Affected Soils in Agriculture: Incorporation of Soil Salinity Control Methods. Academic Press. Oxford, England.
- Acosta Solís, M. 1965. Los Recursos Naturales del Ecuador y Su Conservación. 1era. Parte. Imprenta Popular. Mexico D.F., Mexico.
- Alesso, C., P. Cipriotti, G. Bollero and N. Martin. 2019. Experimental designs and estimation methods for on-farm research: A simulation study of corn yields at field scale. *Agronomy Journal* 111(6): 2724-2735.
- Alvarado, S. 1999. Determinación de un método para evaluar los requerimientos de cal en suelos ácidos de origen volcánico y no volcánico del Ecuador. Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Escuela Politécnica de Chimborazo. Ingeniera Química. Riobamba, Ecuador. 156 p.
- Alvarado, S. 2004. Basic nutrient cation chemistry of two Ecuadorian andisols. College of Agriculture, University of Kentucky. Master of Science. Lexington, Kentucky, USA. 208 p.
- Alvarado, S., F. Valverde, V. Novoa, Y. Cartagena y R. Parra. 2009. Guía de recomendaciones de fertilización para los principales cultivos del Callejon Interandino. Boletín Técnico N° 127. INIAP. Quito, Ecuador.
- Amores, F. 1993. Estación Experimental Tropical Pichilingue, 50 años de investigación en el campo Agropecuario (1943-1999). INIAP. Quevedo, Ecuador.
- Ashley, K., D. Cordell and D. Mavinic. 2011. A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere* 84(6): 737-746.
- Barnes, C., D. Campaña, J. Noroña y J. Garófalo. 2017. Breve historia del INIAP y *Puccinia striiformis* en Ecuador. En: A. León (ed). Tercer Simposio de Fitopatología Control Biológico e Interacciones Planta-Patógeno. USFQ. Quito, Ecuador.
- Barriga, S. y F. Mite. 2004. Diagnóstico de la salinidad de los suelos cultivados en las principales áreas bajo riego del Ecuador. INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue. Quevedo, Ecuador.
- Batista, M., I. Moscheta, C. Bonato, M. Batista, O. Garcia de Almeida and T. Inoue. 2012. Aluminum in corn plants: Influence on growth and morpho-anatomy of root and leaf. *R. Bras. Ci. Solo* 37: 177-187.
- Begg, C., G. Kirk, A. Mackenzie and H. Neue. 1994. Root-induced iron oxidation and pH changes in the lowland rice rhizosphere. *New Phytologist* 128(3): 469-477.

- Benavides, G. y E. Gonzales. 1988. Determinación de las propiedades Andicas y clasificación de algunos suelos de páramo. *Suelos Ecuatoriales* 17: 58-64.
- Bidel, L., P. Renault, L. Pagès and L. Riviere. 2000. Mapping meristem respiration of *Prunus persica* (L.) Batsch seedlings: potential respiration of the meristems, O₂ diffusional constraints and combined effects on root growth. *Journal of Experimental Botany* 51(345): 755-768.
- Bleam, W. 1990. The nature of cation-substitution sites in phyllosilicates. *Clays and Clay Minerals* 38(5): 527-536.
- Borchardt, G. 1982. Montmorillonite and other smectite minerals. In: R. Dinauer (ed). *Minerals y Soil Environment*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. p. 293-330.
- Brady, N. and R. Weil. 2008. *An Introduction to the Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall. USA.
- Briceño, M., G. Escudey, D. Galindo, D. Borchard and A. Chang. 2004. Characterization of chemical phosphorus forms in volcanic soils using ³¹P-NMR spectroscopy. *Communications in Soil Science & Plant Analysis* 35(9): 1323-1337.
- Cáceres, J. 1974. Interpretación de los análisis de suelos y recomendaciones de fertilización. En: G. Cisneros (ed). *Memorias del 1er Curso Nacional de Leguminosas de Grano*. Ministerio de Agricultura. Quito, Ecuador.
- Calva, C. y J. Espinosa. 2017. Efecto de la aplicación de cuatro materiales de encalado en el control de la acidez de un suelo de Loreto, Orellana. *Siembra* 4: 110-120.
- Camberato, J. 2007. *Cation exchange capacity-everything you want to know and much more*. Clemson University, Crop and Soil Environmental Science. Clemson, USA.
- Chamorro, C. 2021. El INIAP y la modernización de la hacienda serrana en Ecuador (1963-1973). *Historia Agraria de América Latina* 2(2): 129-150.
- Chico, J. 2019. Evaluación del cambio en la capacidad de intercambio iónico de suelos ácidos por efecto del encalado. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ingeniero Agrónomo. Quito, Ecuador. 114 p.
- Cordell, D. and S. White. 2013. Sustainable phosphorus measures: strategies and technologies for achieving phosphorus security. *Agronomy* 3(1): 86-116.
- Córdova, J., F. Valverde and J. Espinosa. 1996. Phosphorus residual effect in Andisols cultivated with potatoes. *Better Crops International* 10(2): 6-8.
- Corley, R. y P. Tinker. 2009. *La Palma de Aceite*. Cuarta ed. Molher Ltda. Bogota, Colombia.
- Cravo, M., J. Smyth e E. Carvalho. 2012. Calagem em latossolo amarelo distrófico da Amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas anuais. *R. Bras. Ci. Solo* 36: 895-907.
- Cuvi, N. 2009. Las semillas del imperialismo agrícola estadounidense en el Ecuador. *Procesos*. Revista Ecuatoriana de Historia 30(2): 69-98.
- Dahlgren, R., M. Saigusa and F. Ugolini. 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy* 82: 113-182.
- De Mello Prado, R. e W. Natalle. 2004. Calagem na nutrição de cálcio e no desenvolvimento do sistema radicular da goiabeira. *Pesq. Agropec. Bras.* 39(10): 1007-1012.
- Díaz, V. y S. Sadeghian. 2018. Adsorción de fósforo en suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 69(2): 7-16.

- Elser, J. 2012. Phosphorus: a limiting nutrient for humanity? *Current Opinion in Biotechnology* 23(6): 833-838.
- Espinosa, J., J. Córdova y R. Vera. 1987. Evaluación agronómica de fertilizantes fosfatados en zonas altas de Ecuador. En: A. León y O. Arregocés (ed). *Memorias Seminario de Alternativas Sobre el Uso como Fertilizantes de Fosfatos Nativos de América Tropical y Subtropical*. CIAT, IFDC, CIID. Cali, Colombia.
- Espinosa, J. y E. Molina. 1999. *Acidez y Encalado de los Suelos*. IPNI. Quito, Ecuador. DOI: 10.13140/2.1.3888.9281.
- Fageria, N. and A. Nascente. 2014. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*. Elsevier. p. 221-275.
- FAO. 2012. *Guía Para la Descripción de Suelos*. FAO. Roma, Italia.
- Fipps, G. 2003. *Irrigation water quality standards and salinity management strategies*. Texas A&M University. College Station, Texas, USA.
- Flessa, H. and W. Fischer. 1992. Plant-induced changes in the redox potentials of rice rhizospheres. *Plant and Soil* 143(1): 55-60.
- Gambaudo, S. y H. Fontanetto. 1995. *Corrección de la acidez edáfica en el centro de Santa Fe*. INTA, EEA Rafaela. Santa Fe, Argentina.
- Gambaudo, S. y H. Fontanetto. 1997. *Respuesta del cultivo de soja al encalado*. Publicación Miscelánea N° 82. INTA, Centro Regional Santa Fe, EEA Rafaela. Santa Fe, Argentina.
- García, A. 2006. Manejo de suelos con acumulación de sales. En: J. Espinosa (ed). *Memorias del Seminario Sobre Suelos Salinos IPNI-SECS*. Quito, Ecuador.
- García, A. 2003. Tipos de suelos salinos. En: M. Triana, R. Silva, M. Gómez y G. Peñaloza (eds). *Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia. p. 120.
- Gillman, G. 2007. An analytical tool for understanding the properties and behaviour of variable charge soils. *Soil Research* 45(2): 83-90.
- Gollany, H., T. Schumacher, R. Rue and S. Liu. 1993. A carbon dioxide microelectrode for in situ ρCO_2 measurement. *Microchemical Journal* 48(1): 42-49.
- Granda, D. 2005. *Plan de desarrollo estrategico participativo de la provincia de Orellana 2005-2015*. Disponible en <http://Scribd.com/doc/48658216/plan-de-desarrollo-participativo-provincial>
- Guanucha, L. 2019. *Historia de AGROCALIDAD*. MAGAP. Quito, Ecuador. <https://prezi.com/p/gpb6e-he99ys/historia-de-agrocalidad/>
- Harsh, J. 2012. Poorly crystalline aluminosilicate clay minerlas. In: P. Huang, Y. Li and M. Summner (eds). *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes*. CRC Press. Boca Raton, USA. p. 23/21-23/10.
- Hashimoto, Y., J. Kang, N. Matsuyama and M. Saigusa. 2012. Path analysis of phosphorus retention capacity in allophanic and non-allophanic Andisols. *Soil Science Society of America Journal* 76(2): 441-448.
- Havlin, J., J. Beaton, S. Tisdale and W. Nelson. 2014. *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management*. Eight ed. Pearson Prentice Hall.
- Hendershot, W.H. and M. Duquette. 1986. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations. *Soil Science Society of America Journal* 50(3): 605-608.
- Hicks, D., R. Vanden Heuvel and Z. Fore. 1997. Analysis and practical use of information from on-farm strip trials. *Better Crops* 81(3): 18-21.

- Hossain, M. 2016. World pineapple production: an overview. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development* 16(4): 11443-11456.
- ICOMAND. 1986. Report of International Committee on the Classification of Andisols. Circular Letter N° 8. ICOMAND. Tokio, Japan.
- IGM. 2013. Atlas geográfico de la República del Ecuador. IGM-SENPLADES. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2W9Wnug>
- IGM. 2021. Visor geoinformación a nivel nacional. Geoportal del Instituto Geográfico Militar. Accessed from <http://bit.ly/2qMvOPR>
- INIAP. 1963. Informe de Actividades 1963, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Tomo I. INIAP. Quito, Ecuador.
- INIAP. 1990. Informe Anual. Departamento Nacional de Manejo de Suelo y Agua, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Quevedo, Ecuador.
- INIAP. 1996. Informe Técnico 1995. Departamento de Suelos y Fertilizantes, Estación Experimental Santa Catalina, INIAP. Quito, Ecuador.
- INIAP. 2006. Reporte de resultados del proyecto papa INIAP-NCSU. Departamento de Suelos y Aguas, Estación Experimental Santa Catalina, INIAP. Quito, Ecuador.
- Inoue, K. 1988. Al-and Fe-humus complexes in Andisols. In: S. Kinloch, F. Beinroth and H. Eswaran (ed). Proc. 9th Int. Soil Classif. Workshop. Japanese Committee for the 9th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services USA. Tokio, Japan.
- ISFEI. 1972. The Evaluation and Improvement of Soil Fertility in Latin America. International Soil Fertility Evaluation Improvement Program, North Carolina State University. Raleigh, NC, USA.
- ISFEI and North Carolina State University. 1974. The Evaluation and Improvement of Soil Fertility in Latin America: Annual report and project summary to Agency for International Development. North Carolina State University. Raleigh, NC, USA.
- Johnston, A. 2000. Soil and Plant Phosphate. International Fertilizer Industry Association. Paris, France.
- Johnston, A. 2009. A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. *Better Crops* 93(3): 14-16.
- Jones, D., P. Dennis, A. Owen and P. Van Hees. 2003. Organic acid behavior in soils—misconceptions and knowledge gaps. *Plant and Soil* 248(1): 31-41.
- Kamprath, E.J. 1984. Crop response to lime on soils in the tropics. In: F. Adams (ed). *Soil Acidity and Liming*. ASA. Wisconsin, USA. p. 349-368.
- Kodama, H. 2012. Phyllosilicates. In: P. Huang, Y. Li and M. Summner (eds). *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes*. CRC Press. Boca Raton, USA. p. 21/21-21/48.
- León, J. 2010. Manual de Geografía del Ecuador. Universidad Andina Simón Bolívar, sede Ecuador - Corporación Editora Nacional. Quito, Ecuador.
- Lindsay, W. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley and Sons Ltd. New York, USA.
- Lucero, H. 2011. Manual del cultivo de la papa en la Sierra Sur. Manual N° 90. Estación Experimental del Austro, INIAP. Cuenca, Ecuador.
- Manrique, R. 2021. Determinación de la salinidad de suelos arroceros mediante el uso de sensores remotos en el cantón Daule-Guayas. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Agraria del Ecuador. Ingeniero Agrónomo. Guayaquil, Ecuador. 115 p.

- Marschner, H. and V. Römheld. 1994. Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant and Soil* 165(2): 261-274.
- Mashayekhi, P., Z. Abbasi, M. Tatari and M. Mahmoodi-Eshkaftaki. 2014. Determination of soil seature effects on plant-svailable phosphorus extraction using response surface and Cate–Nelson methodology. *Communications in soil science and plant analysis* 45(15): 2046-2057.
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013a. Perfil PM4-P196. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3wL0RK4>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013b. Perfil PN4-P152. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3C1ZRLz>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013c. Perfil PN4-P166. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3D2YAMu>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2013d. Perfil PN8-P167. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3bXx2fA>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2014. Perfil PN1-P219. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/35KDarO>
- MIDENA, IEE, SENPLADES y MAGAP. 2015. Perfil PM1-P260. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. IEE. Quito, Ecuador. <https://bit.ly/3bYVjID>
- Miller, E. 1959. Agricultural Ecuador. *Geographical Review* 49(2): 183-207. <https://doi.org/10.2307/211984>
- Mite, F. 2013. Acidificación de los suelos bananeros. Problemática y solución. En: IV Cumbre Mundial del Banano. ZAMORANOS-AGEARTH-EXPOPLAZA. Guayaquil, Ecuador.
- Mite, F., M. Carrillo and J. Espinosa. 1999. Fertilizer use efficiency in oil palm is increased under irrigation in Ecuador. *Better Crops International* 13(1)(1): 30-32.
- Mite, F., M. Carrillo y J. Espinosa. 2004. Influencia de la fertilizacion y el riego sobre el desarrollo, nutricion y rendimiento de la palma africana en Ecuador. Estación Experimental Tropical Pichilingue, INIAP. Quevedo, Ecuador.
- Mite, F., J. Espinosa and L. Medina. 2010. Liming effect on pineapple yield and soil properties in volcanic soils. *Better Crops* 94(1): 4-6.
- Motato, N. y J. Pincay. 2016. Áreas cacaoteras de Manabí: Disponibilidad nutrimental de los suelos y calidad de las aguas para riego. En: J. Espinosa (ed). *Memorias XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador.
- Mukhopadhyay, R., B. Sarkar, H.S. Jat, P.C. Sharma and N. Bolan. 2020. Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*: 111736.
- Nanzyo, M. and H. Kanno. 2018. *Inorganic Constituents in Soil*. Springer. Singapore.
- Naranjo, E. y I. Tufiño. 1979. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). 17 años al servicio del agro ecuatoriano (1962-1979). INIAP. Quito, Ecuador.
- Neil, C. and N. Claudi. 1991. Ground works 1: Managing soil acidity. *Proceedings of Tropical Soils Workshop on Soil Acidity and Liming*, Raleigh, North Carolina, USA. North Carolina State University.
- Nelson, L. 1999. *Estadística en la Investigación del Uso de Fertilizantes*. Instituto Internacional de Nutrición de Plantas. Quito, Ecuador.

- Neumann, G. and V. Römheld. 1999. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *Plant and Soil* 211(1): 121-130.
- OEA. 1964. Los suelos de la cuenca del Guayas. Departamento de Asuntos Económico, Unión Panamericana. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Washington, D.C., USA.
- Ortiz, M., R. Zapata y S. Sadeghian. 2006. Propiedades de la materia orgánica y capacidad complejante sobre el aluminio en algunos suelos ándicos en Colombia. *Cenicafé* 57(1): 51-57.
- Ortiz, S., V. Loayza y G. Albán. 2010. Gestión de datos edáficos en la cuenca baja del río Guayas con la implementación de un Sistema de Administración de Geoinformación -SAG. En: J. Espinosa (ed). XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo: El suelo como factor de mitigación del cambio climático. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, Ecuador. <http://bit.ly/36nEZ9A>
- Osorno, H. y L. Osorno. 2010. Determinación de los requerimientos de cal. *Suelos Ecuatoriales* 41(1): 29-35.
- Padilla, W. 1979. Guía de recomendaciones de fertilización para los principales cultivos de Ecuador. Boletín Técnico N° 32. INIAP. Quito, Ecuador.
- Parfitt, R. and B. Clayden. 1991. Andisols—the development of a new order in soil taxonomy. *Geoderma* 49(3-4): 181-198. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90075-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90075-5)
- Pérez, A. 2019. Riesgo de sodicidad en los suelos de cantón Milagro, Guayas-Ecuador en época de estiaje. *Revista Politécnica* 42(2): 15-22.
- Petersen, W. and M. Böttger. 1991. Contribution of organic acids to the acidification of the rhizosphere of maize seedlings. *Plant and Soil* 132(2): 159-163.
- Pourrut, P. 1983. Climas del Ecuador. Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/35zG10P>
- Pozo, W., T. Sanfeliu y G. Carrera. 2010. Variabilidad espacial temporal de la salinidad del suelo en los humedales de arroz en la cuenca baja del Guayas, Sudamérica. *Revista Tecnológica-ESPOL* 23(1): 73-79.
- Qafoku, N., E. Van Ranst, A. Noble and G. Baert. 2004. Variable charge soils: their mineralogy, chemistry and management. In: D. Sparks (ed). *Advances in Agronomy* 84. Elsevier. Oxford, England. p. 159-215.
- Rhoades, J., F. Chanduvi and S. Lesch. 1999. *Soil Salinity Assessment: Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements*. FAO. Rome, Italy.
- Robles, V. 2011. *Memorias de 50 años de vida del Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP)*. INIAP. Guayaquil, Ecuador.
- Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez and M. Mora. 2006. Acidification of volcanic soils from Chile. In: IV International Symposium on Deteriorated Volcanic Soils. Morelia, Mexico.
- Sánchez, D., J. Merlo, R. Haro and M. Acosta. 2018. Soil from the Amazonia. In: J. Espinosa, J. Moreno and G. Bernal (eds). *The Soils of Ecuador*. World Soils Book Series. Springer. Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0_3
- Sancho, H. y E. Molina. 2016. Efecto del Mg y pH en la reducción de la toxicidad de Al en plantas de banano cultivadas en solución hidropónica. *Revista Siembra* 3: 20-22.
- Sanewski, G., D. Bartholomew and R. Paul. 2018. *The Pineapple: Botany, Production and Uses*. Second ed. CABI. Boston, USA.
- Scholz, R., A. Ulrich, M. Eilittä and A. Roy. 2013. Sustainable use of phosphorus: a finite resource. *Science of the Total Environment* 461: 799-803.

- SECS. 2016. Historia de la RELASE. Disponible en <http://www.secsuelo.org/historia>
- Shahid, S., M. Zaman and L. Heng. 2018. Introduction to soil salinity, sodicity and diagnostics techniques. In: M. Zaman, S. Shahid and L. Heng (eds). *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Springer. Cham, Switzerland. p. 1-42.
- Shen, J., L. Yuan, J. Zhang, H. Li, Z. Bai, X. Chen, W. Zhang and F. Zhang. 2011. Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant physiology* 156(3): 997-1005.
- Shoemaker, H., E. McLean and P. Pratt. 1961. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Science Society of America Journal* 25(4): 274-277.
- Shoji, S., M. Nanzyo and R. Dahlgren. 1993. *Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands. <http://bit.ly/37KSKzr>
- Silva, I., T. Smyth, D. Israel, C. Raper and T. Rufty. 2001. Magnesium ameliorates aluminum rhizotoxicity in soybean by increasing citric acid production and exudation by roots. *Plant and Cell Physiology* 42(5): 546-554. <https://doi.org/10.1093/pcp/pce067>
- Soil Survey Staff. 2006. *Keys to soil taxonomy*. 10th ed. USDA - NRCS. Washington DC, USA. <http://bit.ly/2kEtubf>
- Sollins, P. 1991. Effects of phosphorus sorption soil microstructure on in soils of the humid tropics. In: H. Tiessen, D. Lopez and I. Salcedo (ed). *Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. Regional workshop 3: South and Central America*. SCOPE-UNEP. Maracay, Venezuela.
- Sollins, P., G. Robertson and G. Uehara. 1988. Nutrient mobility in variable and permanent-charge soils. *Biogeochemistry* 6(3): 181-199.
- Tabatabai, M. and J. Bremner. 1972. Forms of sulfur, and carbon, nitrogen and sulfur relationships, in Iowa soils. *Soil science* 114(5): 380-386.
- Takahashi, T. and R.A. Dahlgren. 2016. Nature, properties and function of aluminum-humus complexes in volcanic soils. *Geoderma* 263: 110-121.
- Takahashi, T., K. Yamada, H. Kanno and M. Nanzyo. 2010. Organic carbon accumulation in Andisols:(2) contribution of aluminum-humus complexes to carbon accumulation in non-allophanic Andisols. *J Integr Field Sci* 7: 69-72.
- Tan, K., W. Keltjens and G. Findenegg. 1992. Aluminium toxicity with sorghum genotypes in nutrient solutions and its amelioration by magnesium. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 155(2): 81-86.
- Tedesco, M., C. Gianello, I. Anghinoni, C. Bissani, F. Camargo e S. Wietholter. 2004. *Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Porto Alegre, Brasil.
- Thomas, G. and W. Hargrove. 1984. The chemistry of soil acidity. In: F. Adams (ed). *Soil Acidity and Liming*. ASA, CSSA, SSSA. Madison, WI, USA. p. 3-56.
- Uehara, G. 1978. Mineralogy of predominant soils in the tropical and sub-tropical regions. In: C. Andrew and E. J. Kamprath (ed). *Mineral Nutrition of Legumes in Tropical and Sub-tropical soils*. CSIRO. Melbourne, Australia.
- Uehara, G. and G. Gillman. 1980. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: I. Theory. *Soil Science Society of America Journal* 44(2): 250-252.
- Uehara, G. and G. Gillman. 1981. *The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays*. Westview Press, Inc. Boulder, USA.

- Van Breemen, N. 1987. Effects of redox processes on soil acidity. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 35(3): 271-279.
- Van Ranst, E., N. Qafoku, A. Noble and R. Xu. 2017. *Variable Charge Soils: Mineralogy and Chemistry*. CRC Press Taylor & Francis. New York, USA.
- Vélez, M. 2015. Efecto de la corrección de acidez y aplicación de herbicidas en la erradicación de la Llashipa (*Pteridium arachnoideum*). Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Loja. Ingeniero Agrónomo. Loja, Ecuador. 125 p.
- Villamagua, M., M. Guayanay, R. Rodríguez, E. Vásquez, C. Valarezo y M. Mora. 2021. Efecto del encalado sobre la acidez del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento del café (*Coffea arabica* L.) en Pueblo Nuevo, cantón Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero* 11(1): 166-180.
- Wada, K. 1989. Allophane and Imogolite. In: J. Dixon and S. Weed (eds). *Minerals in the Soil Environment*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
- White, R. 2013. *Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource*. John Wiley & Sons. Boca Raton, USA.
- Winckell, A. 1982. *Relieve y geomorfología del Ecuador: Documento de investigación N° 1*. CEDIG. Quito, Ecuador.
- Zaman, M., S. Shahid and L. Heng. 2018. Irrigation water quality. In: M. Zaman, S. Shahid and L. Heng (eds). *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Springer International Publishing. Cham, Switzerland. p. 113-131. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_5
- Zapata, R. 1996. Especiación de aluminio extraído con KCl 1N. *Suelos Ecuatoriales* 26: 97-101.
- Zapata, R. 2004. *La Química de la Acidez del Suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia.
- Zebrowski, C. y M. Sourdat. 1997. Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador. In: A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski y M. Sourdat (eds). *Los Paisajes Naturales del Ecuador. Volumen 1: Las Condiciones Generales del Medio Natural*. CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM. Quito, Ecuador. <http://bit.ly/2kory6p>
- Zehetner, F., W. Miller and L. West. 2003. Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67(1): 1797-1809. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1797>
- Zhang, X. and A. Zhao. 1997. Surface charge. In: T. Yu (ed). *Chemistry of Variable Charge Soils*. Oxford University Press. Oxford, USA. p. 17-64.

MICROORGANISMOS BENÉFICOS — EN SUELOS DE ECOSISTEMAS NATURALES — Y AGROECOSISTEMAS DEL ECUADOR

María Eugenia Ávila Salem, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador:
mavila@uce.edu.ec

Narcisa Urgiles Gómez, Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja: narcisa.urgiles@unl.edu.ec

Paul Loján Armijos, Departamento de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Técnica Particular de Loja: pdlojan@utpl.edu.ec

Salomé Araujo Abad, Instituto de Investigación, Desarrollo e Innovación en Biotecnología Sanitaria de Elche (IDiBE), Universidad Miguel Hernández, Alicante, España: lourdes.araujo@goumh.umh.es

RESUMEN

Los microorganismos de los ecosistemas naturales y agroecosistemas se caracterizan por la alta diversidad y por su rol fundamental en el equilibrio ecológico y la salud del suelo. La acidificación y la salinización promovida por la excesiva aplicación de insumos químicos, así como la labranza continua, la compactación y la erosión cambian las características físico-químicas del suelo generando un impacto negativo en las comunidades de microorganismos que lo habitan. Cada especie vegetal convive en estrecha asociación con una comunidad específica de microorganismos tanto mutualistas, simbiotes, comensales y patógenos denominada microbioma. Una alta biodiversidad de microorganismos asegura la calidad del suelo y mejora el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos. En este ambiente dinámico los microorganismos benéficos son importantes para el mantenimiento de la vida en los ecosistemas. Se han identificado varios grupos de microorganismos benéficos en los suelos de Ecuador, como las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) que ejercen su acción a través de mecanismos directos como la producción de fitohormonas, sideróforos, enzimas y ácidos orgánicos, o por mecanismos indirectos como la activación de instrumentos de defensa ante el ataque de patógenos. Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son otro grupo de microorganismos benéficos que desarrollan una relación simbiótica con las raíces de las plantas para generar un aumento significativo de la superficie radicular debido a la producción de abundantes hifas que ayudan a las plantas a sobrevivir en condiciones relativamente adversas como sequía, deficiencia de nutrientes y pobres características físico-químicas del suelo. Por otro lado, es importante también mencionar a los hongos del género *Trichoderma* que actúan como agentes biológicos para el control de enfermedades ocasionadas por patógenos radiculares. La investigación conducida en los últimos años en Ecuador, ha permitido identificar y caracterizar los microorganismos benéficos del suelo en algunos sistemas agrícolas y forestales. Este capítulo discute lo más relevante de estos trabajos de investigación.

ABSTRACT

Microorganisms from undisturbed ecosystems and agroecosystems of tropical regions are characterized by a high diversity and have a fundamental role in the ecological balance and soil health. Acidification and salinization promoted by excessive application of agricultural inputs, as well as continuous soil tillage, compaction, and erosion, change the soil physical-chemical characteristics and have a negative impact on soil microorganism communities. Each plant species coexists in a tight association with a specific community of mutualists, commensal, symbiotic and pathogenic microorganisms called the microbiome. A high microorganism biodiversity ensures soil quality and improves crop performance and health. In this dynamic environment, beneficial microorganisms are important to maintain ecosystem life. Several groups of beneficial microorganisms have been identified in Ecuadorian soils, like the plant growth promoting bacteria (PGPR) through direct mechanisms such as the production of phytohormones, siderophores, enzymes, and organic acids, or through indirect mechanisms such as activation of defense instruments against pathogen attacks. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are another group of beneficial microorganisms that develop a symbiotic relationship with plant roots generating a significative increment in root surface due to the production of abundant hyphae which help plant to resist adverse conditions such as drought, nutrient deficiencies, and poor soil characteristics. On the other hand, the presence of antagonistic fungi like the *Trichoderma* spp. is also important in their role as biological controllers against diseases caused by soil pathogens. Research conducted recently in Ecuador allowed the identification and characterization of soil beneficial microorganisms in diverse agricultural and forest systems. This chapter discusses the most relevant information regarding research work.

9.1. Introducción

El suelo es un sistema complejo donde ocurren múltiples procesos físicos, químicos y biológicos generando una alta heterogeneidad de condiciones. En este ambiente dinámico, los microorganismos, en especial los microorganismos benéficos, tienen importantes roles en el mantenimiento de la vida en los ecosistemas. Los microorganismos del suelo participan en múltiples procesos como la formación de agregados, aireación, transformación de la materia orgánica, ciclaje de nutrientes, nutrición vegetal, crecimiento y desarrollo de las plantas. Además, contribuyen en la sanidad vegetal (control de plagas y enfermedades), en la regulación del clima y la humedad del suelo, ayudan en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados y muchos de ellos son utilizados como materia prima para la elaboración de productos farmacéuticos. Se considera que los microorganismos benéficos están entre los más importantes proveedores de servicios ecosistémicos (Brady and Weil, 2008; Saccá, *et al.*, 2017).

Por otro lado, también es reconocida la relación entre los microorganismos y la rizósfera en la dinámica de los procesos en el suelo. La rizósfera se define como la estrecha zona del suelo que rodea el sistema radicular de las plantas y que está influenciada por las secreciones de las raíces y los microorganismos asociados (Pieterse, *et al.*, 2014). La comunidad de la rizósfera consiste en una microbiota principalmente compuesta por bacterias, actinomicetos y hongos que forman comunidades únicas que tienen considerable potencial para establecer asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas cumpliendo un rol esencial en los procesos biogeoquímicos y en los de la materia orgánica del suelo. Además, la rizósfera también incluye micro y mesofauna de protozoos, nemátodos, insectos y ácaros que contribuyen significativamente con el catabolismo de sustancias nocivas en la rizósfera. Las comunidades de la rizósfera son muy complejas y su composición varía entre las diferentes especies vegetales y los diferentes microambientes en una dinámica que permite mantener la salud del suelo y de la planta (Rout and Southworth, 2013).

Entre los microorganismos más prometedores en la agricultura moderna (particularmente en el mantenimiento de la fertilidad y recuperación de suelos degradados) se encuentra un grupo diverso de bacterias conocidas en conjunto como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) y el grupo de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Ambos grupos son conocidos por sus efectos como estimuladores del crecimiento y de la salud de las plantas (Desai, *et al.*, 2016; Urgiles-Gómez, *et al.*, 2021). Estas particularidades hacen que tanto las BPCV como los HMA sean considerados herramientas biotecnológicas que en algunos casos son aprovechadas para la conservación de ecosistemas, producción agrícola y silvícola, restauración de suelos degradados y propagación de comunidades vegetales (De Beenhouwer, *et al.*, 2015; Schüßler, *et al.*, 2016; Babushkina, *et al.*, 2017).

La reconocida importancia de los microorganismos benéficos para promover un manejo sostenible del suelo ha promovido la investigación en el campo agrícola y forestal que ha generado la información que se discute a continuación.

9.2. Diversidad microbiana de suelos en Ecuador

9.2.1. Bacterias promotoras del crecimiento vegetal

El dominio Bacteria es el más diverso entre los organismos que habitan nuestro planeta (Coleman, *et al.*, 2021). Algunas estimaciones recientes sugieren que la diversidad mundial de los reinos Bacteria y Archaea podría albergar entre 2.2 y 4.3 millones de especies distribuidas en todo el mundo (Louca, *et al.*, 2019). Las bacterias cumplen diversos roles en el funcionamiento de los ecosistemas debido a su extensa diversidad filogenética y metabólica (Madigan, *et al.*, 2008).

Aunque las relaciones filogenéticas del reino Bacteria aún no están del todo esclarecidas, el desarrollo de métodos más robustos de análisis ha permitido resolver algunas interrogantes respecto a su evolución (Louca, *et al.*, 2019). Tradicionalmente, la gran mayoría de los estudios respecto a la diversidad bacteriana se

basaron en análisis dependientes de técnicas de cultivo en laboratorio, pero los avances de las herramientas moleculares sugieren que menos del 1 % de las bacterias se pueden cultivar en estas condiciones (González y Fierro, 2009). Actualmente, con el desarrollo de técnicas más avanzadas como la metagenómica, es posible analizar con más detalle la gran diversidad de bacterias presentes en el suelo. Sin embargo, gran parte de los estudios de diversidad de las bacterias del suelo se han realizado en países europeos y en Estados Unidos, existiendo muy poca información sobre la diversidad bacteriana de países tropicales, aunque se ha sugerido que la mayor parte de las especies bacterianas tienen distribución global (Louca, *et al.*, 2019). En Ecuador hay escasa información acerca de la diversidad bacteriana y la mayor parte de trabajos publicados se basan en el estudio de comunidades asociadas a cultivos de interés comercial y que por tanto podrían tener potencial biotecnológico. Dentro de este grupo se encuentran las BPCV. Se considera que el desarrollo de tecnologías que incluyan el uso de estas bacterias sería importante para promover la producción a cargo de pequeños productores del Ecuador (Yarzabal and Chica, 2021).

Las BPCV son un grupo polifilético de bacterias cuya característica común es su capacidad de promover el crecimiento de las plantas a través de mecanismos directos: producción de fitohormonas, solubilización de fósforo (P), producción de sideróforos y de la enzima ACC desaminasa (1-aminociclopropane-1-carboxylate deaminase), o a través de mecanismos indirectos como antagonismo con microorganismos patógenos, activación de los mecanismos de defensa vegetal ante el ataque de patógenos, etc. Algunos géneros de bacterias BPCV de gran utilidad para los cultivos son: *Actinobacteria*, *Arthrobacter*, *Azoarcus*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Caulobacter*, *Chromobacterium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Micrococcous*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia*, *Streptomyces* (Ahemad and Kibret, 2014).

En el marco del proyecto VALORAM (Valorizing Andean Microbial Diversity Through Sustainable Intensification of Potato-Based Farming Systems), financiado por la Comunidad Europea en 2009, se realizó el aislamiento, identificación y evaluación de algunas BPCV asociadas al cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en cuatro localidades de tres provincias del sur de Ecuador: Cañar, Azuay y Loja (**Figura 9.1**).

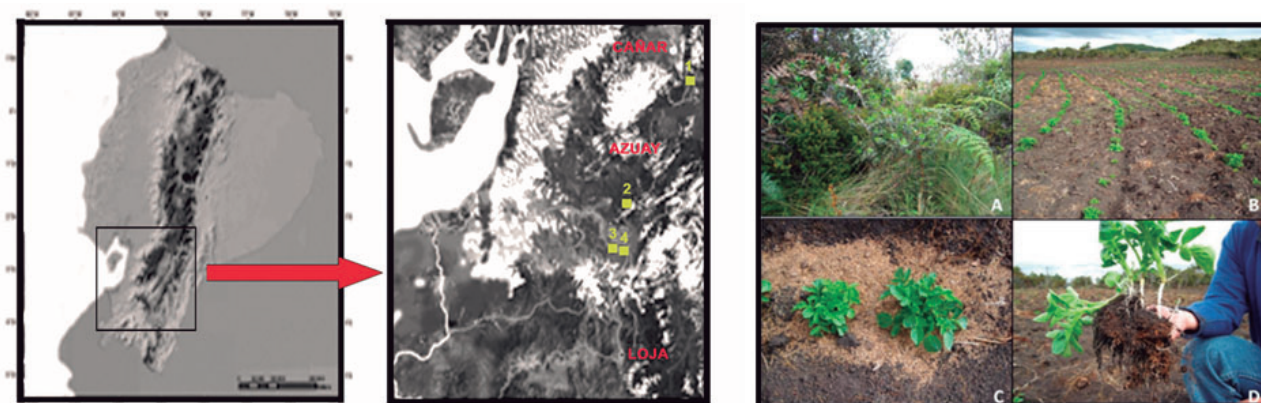


Figura 9.1. Localidades de muestreo en el Sur del Ecuador para el aislamiento de BPCV asociadas al cultivo de papa.

Se identificaron las siguientes cepas bacterianas con posible potencial biotecnológico: R47065, R47131, R49538, R49540, R49541 y R49597 debido a su comportamiento antagonista frente a *Rhizoctonia solani* y *Phytophthora infestans*, dos de las enfermedades más importantes en el cultivo de la papa y, además, por su capacidad para producir AIA (ácido indolacético) y solubilizar P del suelo (**Cuadro 9.1**). Estas cepas se utilizaron posteriormente en un experimento a nivel de campo en donde la cepa R47065 (*Bacillus* sp.) demostró un efecto positivo para promover el desarrollo y producción del cultivo (Velivelli, *et al.*, 2015).

Uno de los grupos de BPCV más estudiado en Ecuador es el de rizobios asociados al fréjol (*Phaseolus vulgaris*). La diversidad de especies noduladoras del fréjol en Ecuador sugiere que probablemente el país sea uno de los centros de diversificación de este cultivo (Debouck, *et al.*, 1993; Bernal and Graham, 2001; Torres-Gutiérrez, *et al.*, 2017). Entre 1986 y 1989 se aislaron cepas de rizobios que fueron aisladas de

suelos de varias localidades de la Sierra ecuatoriana, encontrándose después que la mayor parte de las cepas corresponde a tres nuevos linajes agrupados dentro del clado *Rhizobium* (*R. phaseoli*, *R. etli* y *R. leguminosarum*) (Ribeiro, *et al.*, 2013). El aislamiento de las cepas fue una de las primeras actividades del Proyecto Bean Cowpea CRSP, liderado por el Dr. Peter Graham, en el cual colaboró un grupo importante de investigadores ecuatorianos (Bernal, 2022). Una réplica de estas cepas forma parte del banco germoplásmico del Laboratorio de Rizobiología del Departamento de Suelos de la Universidad de Minnesota. Posteriormente, Ribeiro, *et al.* (2015) reportaron la presencia de una nueva especie en Ecuador: *Rhizobium ecuadorensis*. Torres-Gutiérrez, *et al.* (2017), por su parte, amplificaron el gen 16S rRNA identificando nueve especies de rizobios asociados a este cultivo en el sur del Ecuador: *Rhizobium tropici*, *R. etli*, *R. etli* *bv.* *Mimosae*, *R. leguminosarum*, *R. leguminosarum* *bv.* *Viciae* COL6, *R. mesoamericanum* NAM1, *R. undicola* y dos especies no identificadas dentro de este género. Estudios sobre la diversidad de rizobios asociados a la leguminosa de bosque seco *Clitoria brachystegia* lograron determinar la identidad de algunas especies de rizobios asociados a sus raíces: *Rhizobium multihospitium*, *R. miluonense*, *R. viscosum*, *R. larrymoorei*. Esta información podría utilizarse en planes de conservación de esta leguminosa (Soto-Valenzuela, *et al.*, 2021).

El INIAP, a través del Proyecto denominado “Selección de cepas de *Rhizobium* adaptadas a condiciones de campo y su uso como inoculantes de leguminosas de la Sierra y Costa Ecuatoriana” (PROMSA IQ-CV-081), incrementó el banco germoplásmico de cepas de rizobios liofilizadas, seleccionando las mejores en términos de fijación biológica de nitrógeno atmosférico (N_2) para cultivos como fréjol (UMR 1478, UMR 1481 y UMR 1468), arveja (ECUA-I1, ECUA-Z2 y ECUA-P3), alfalfa (UMR 6008 y TAL 380), soya (CIAT 51, UMR6001, ECUS-001 y ECUS1-SJ) y maní (ECUM-L 102 y ECUM-P8-6). Los ensayos conducidos con estas cepas en invernadero y en campos ubicados en fincas de agricultores de la Sierra y Costa, dependiendo del cultivo, mostraron resultados estadísticamente similares a los obtenidos con la aplicación de fertilizante nitrogenado (urea) y superiores al testigo (sin cepa y sin nitrógeno). Las variables analizadas en invernadero y campo fueron peso seco de la raíz y del follaje de la planta y contenido de N en el follaje, además, en campo se incluyó el rendimiento final del cultivo (Bernal, 2004). Además, el proyecto evaluó la efectividad de diferentes sustratos como portadores de la bacteria para la producción de inoculantes determinando que la turba era la mejor alternativa para mantener viva la bacteria. Esta evaluación también incluyó la esterilización del soporte y su efecto en la sobrevivencia (post esterilización) de las cepas. El inoculante elaborado con las cepas para soya fue incorporado al paquete tecnológico del manejo del cultivo, la semilla comercializada por el INIAP se inoculaba antes de la entrega al agricultor, pero el irregular flujo de recursos económicos hizo que esta práctica sea abandonada. En el caso de las cepas seleccionadas para arveja, alfalfa, fréjol y maní, el laboratorio de Protección Vegetal de la Estación Santa Catalina, INIAP, empezó a distribuir las como inoculantes bajo pedido, sirviendo principalmente a comunidades de pequeños productores.

En palma aceitera, la cobertura con pueraria (*Pueraria phaseoloides*) es parte importante del manejo del cultivo debido a que provee de cobertura que limita la erosión, reduce la temperatura del suelo, controla la competencia por malezas, estimula la micro y macro fauna y provee nitrógeno atmosférico (N_2) a las plantas. Para obtener mayor material vegetal para cobertura es importante la presencia de rizobios en el suelo. En general, la inoculación de la pueraria con cepas importadas de rizobio no es eficiente. La investigación conducida por Romero y Bernal (2008) permitió caracterizar las cepas nativas de rizobios asociada a la pueraria. Se aislaron siete cepas de crecimiento rápido y 43 de crecimiento lento en la zona de producción de Quinindé-San Lorenzo, probablemente de los géneros *Rhizobium* y *Bradyrhizobium*. Queda todavía por dilucidar la taxonomía de los rizobios nativos y evaluar la eficiencia de la inoculación con las cepas de crecimiento rápido en la fijación de N_2 .

Los pocos estudios en *Rhizobium* sp orientados al uso agronómico realizados en Ecuador deberían complementarse con estudios moleculares. Se podría caracterizar genotípicamente rizobios endémicos del país para conocer con mayor exactitud su diversidad y la utilización de estas cepas nativas en leguminosas hospederas lo que permitiría potenciar su capacidad de fijación de N_2 . Es fundamental que

estas bacterias puedan utilizarse con frecuencia junto con los HMA, como microorganismos benéficos y biotransportadores del suelo o biofertilizantes para los cultivos.

Es también importante evaluar las propiedades antagónicas de bacterias benéficas, especialmente en cultivos de alto valor y calidad como el cacao que Ecuador exporta al resto del mundo. En este sentido, Serrano, *et al.* (2021) pudieron identificar cepas de bacterias endófitas con capacidad para inhibir dos de los problemas fitosanitarios más importantes de este cultivo: *Moniliophthora roreri* y *Moniliophthora perniciosa*, los resultados obtenidos permitieron determinar 6 cepas (DS03, DS07, DS18, DS23, DS31, DS34 y DS50). A pesar de la identificación molecular de estas cepas, el análisis filogenético permitió inferir que las cepas pertenecen al complejo de *Bacillus subtilis*, específicamente al grupo operacional de *B. amyloliquefaciens*.

Cuadro 9.1. Características de biocontrol de *R. solani* y *P. infestans*, producción IAA, ACC y solubilización de fósforo de los aislamientos de bacterias obtenidos en cultivos de papa de cuatro localidades del sur del Ecuador (Cañar, Azuay y Loja).

Código del aislamiento	Identificación	Ecología	¹ Supresión de <i>R. solani</i> (%)	¹ Supresión de <i>P. infestans</i> (%)	² IAA	³ ACC	³ Solubilización de P
R47065	<i>Paenibacillus</i> sp.	Rizósfera	38.5	25.3	74.8	40	3
R47131	<i>Paenibacillus</i> sp.	Rizósfera	57.8	40.4	-	20	2
R49538	<i>Bacillus simplex</i>	Endófito	4.8	78.7	97.6	60	1
R49539	<i>Paenibacillus</i> sp.	Endófito	6.0	14.1	-	60	1
R49540	<i>Pasteuriaceae bacterium</i>	Endófito	8.4	55.0	-	100	0
R49541	<i>Paenibacillus</i> sp.	Endófito	6.0	19.9	-	60	2
R49597	<i>Bacillus simplex</i>	Endófito	9.6	86.7	-	30	0
FZB24*WG	<i>Bacillus subtilis</i>	Rizósfera	21.3	65.1	26.9	100	1

¹ Se calculó el porcentaje de biocontrol con la fórmula: $(C1-C2 / C1) \times 100$, donde C1 = crecimiento fúngico total del control y C2 = crecimiento fúngico medido en presencia de rizobacterias. Media de cinco repeticiones.

² IAA = Producción de ácido indol-3-acético (mg mL⁻¹). Media de tres repeticiones.

³ ACC = Actividad del 1-aminociclopropano-1-carboxilato desaminasa [nmol (α-cetobutirato) mg⁻¹ h⁻¹]. Media de tres repeticiones.

⁴ Solubilización de fosfato (PO₄). Los aislamientos se clasificaron en una escala de 0 a 5 según el diámetro del halo de la siguiente manera: 0 = sin actividad, 1 = 1-5 mm, 2 = 6-10 mm, 3 = 11-15 mm, 4 = 16-20 mm, 5 = > 20 mm. Medias de cuatro repeticiones.

9.2.2. Hongos formadores de micorrizas arbusculares

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) pertenecen al grupo de los *Glomeromycota* (Schüßler, *et al.*, 2001), cuya presencia data de hace 400 millones de años (Redecker, *et al.*, 2000). El nombre arbuscular proviene de la capacidad de estos hongos para formar en el interior de las raíces ramificaciones dicotómicas repetidas de las hifas denominadas arbuscúlos que asemejan a un árbol en miniatura. Cuando los HMA están en relación simbiótica con las raíces de las plantas se produce un aumento significativo de la superficie radicular debido a la producción de hifas que se extienden desde el interior de la raíz hacia el suelo, condición que ayuda a las plantas a crecer y sobrevivir en condiciones adversas como el estrés por sequía, deficiencia de nutrientes y malas características físico-químicas del suelo (Smith and Read, 2010; Mohammadi, *et al.*, 2011). Es importante ampliar la investigación de los HMA debido a que éstos se encuentran asociados con más del 80 % de las plantas terrestres protegiendo su sistema radicular contra el ataque de fitopatógenos e incrementando la absorción de agua y nutrientes por la planta hospedera (Bertolini, *et al.*, 2018).

9.2.2.1. Micorrizas asociadas a suelos volcánicos de Ecuador

Un estudio a largo plazo para evaluar los cambios en las características físicas, químicas y biológicas de suelos volcánicos bajo labranza de conservación (siembra directa) se encuentra desarrollándose en el Centro Docente Experimental La Tola (CADET) de la Universidad Central del Ecuador (Figura 9.2). La primera fase del estudio demostró que la labranza de conservación y la rotación de cultivos (cereales andinos y leguminosas) mejoró la calidad del suelo debido al incremento del contenido de materia orgánica, actividad biológica, agregados estables, porosidad y humedad en comparación con la labranza convencional. Además, se determinó que existe un notable incremento de la biodiversidad de HMA en el suelo (Ávila-Salem, *et al.*, 2020; Montesdeoca, *et al.*, 2020). Estos estudios caracterizaron e identificaron morfológicamente por primera vez la diversidad de HMA en este tipo de suelos, encontrando especies como *Gigaspora margarita*, *Rhizoglyphus sinuosus*, *Diversispora celata*, *Glomus ambisporium*, *Acaulospora alpina*, y *A. scrobiculata*, *Pacispora robiginia*, *Scutellospora calospora*,

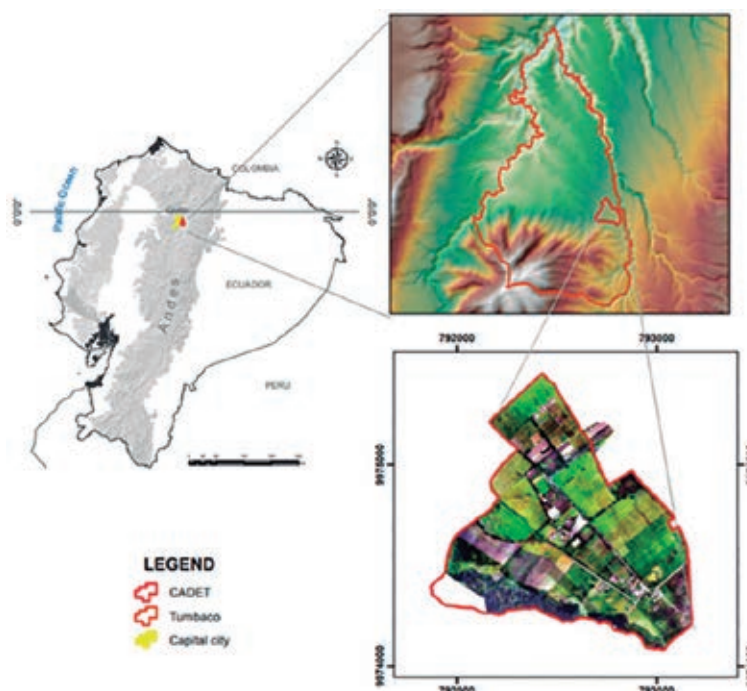


Figura 9.2. Ubicación de las parcelas experimentales en el CADET, UCE. Tumbaco, Quito, Ecuador

encontrando especies como *Gigaspora margarita*, *Rhizoglyphus sinuosus*, *Diversispora celata*, *Glomus ambisporium*, *Acaulospora alpina*, y *A. scrobiculata*, *Pacispora robiginia*, *Scutellospora calospora*,

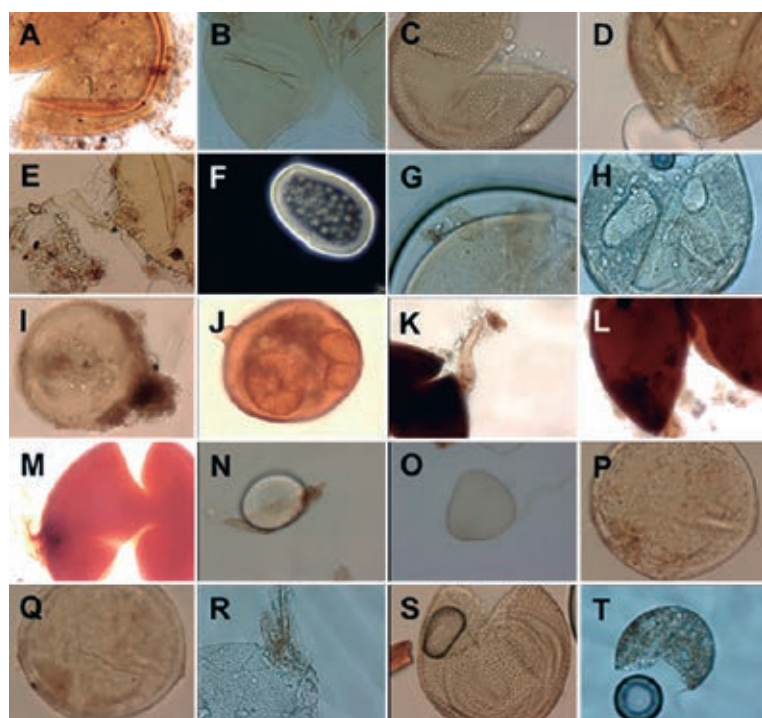


Figura 9.3. Principales estructuras de las esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) encontrados en rotaciones fréjol- maíz y fréjol-amaranto en suelos volcánicos suelos del CADET, UCE (Ávila-Salem, *et al.*, 2020).

Funneliformis mosseae, *Claroideoglossum lamellosum*, *Glomus* sp. y *Ambispora* sp. (Figura 9.3). En un estudio posterior en las mismas parcelas se implementaron rotaciones de fréjol-maíz y fréjol-amaranto lográndose evidenciar la colonización micorrízica en las raíces de estos cultivos con estructuras de arbusculos y vesículas (Figuras 9.3 y 9.4). En la etapa inicial o de transición entre labranza convencional (LC) hacia siembra directa (SD) de estos estudios a largo plazo, se demostró que incluso en el primer ciclo de las rotaciones (fréjol), la productividad fue 42 % más alta en SD que en LC.

Por otro lado, Loján, *et al.* (2017) inocularon el HMA *Rhizophagus irregularis* DAOM 197198 en parcelas de dos localidades, la Estación Experimental Santa Catalina, Quito (suelo volcánico) y en la Estación Experimental El Huayco, Loja (suelo de propiedades vérticas),

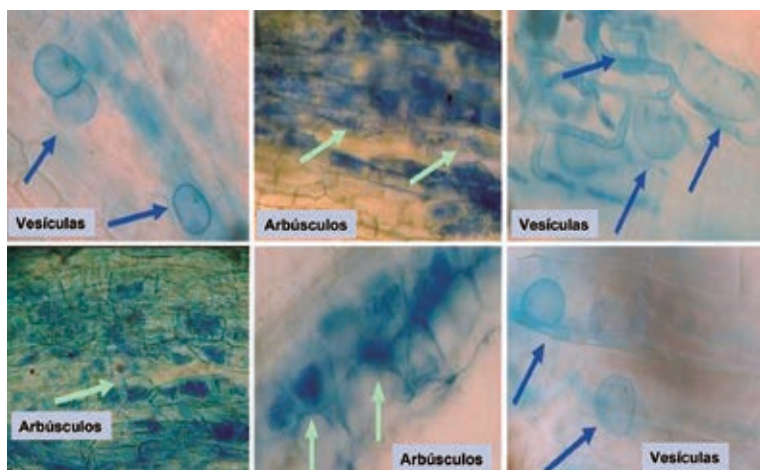


Figura 9.4. Propágulos de HMA bajo microscopía 100x que muestran arbusculos y vesículas en las raíces de fréjol, maíz y amaranto cultivados en suelos volcánicos del CADET, UCE.

LSUmAr), el uso de 454 GS-FLX + sequencing y posterior análisis bioinformático, permitió descubrir una diversa comunidad nativa de HMA asociada al cultivo, encontrándose un total de 40 especies de HMA pertenecientes a 10 diferentes géneros: *Acaulospora* (*A. laevis*, *A. scrobiculata*, *A. sieverdingii* like y 7 especies no definidas), *Rhizophagus* (*R. irregularis*, *R. intraradices*, *R. invermaium*, *R. proliferus* y 3 especies no definidas), *Claroideoglossum* (*C. claroideum*, *C. etunicatum*, *C. etunicatum*-like y 2 especies no definidas), *Scutellospora* (*S. spinosissima*, *S. gilmorei* y 2 especies no definidas), *Funneliformis* (*F. caledonius*, *F. mosseae* y 2 especies no definidas), *Gigaspora* (*G. margarita* y *G. rosea*), *Paraglossum* (*P. laccatum*-like, *P. occultum*), *Archaeospora* (*A. schenkii* y una especie no definida), *Pascispora scintillans* y *Diversispora* sp. (Figura 9.5).

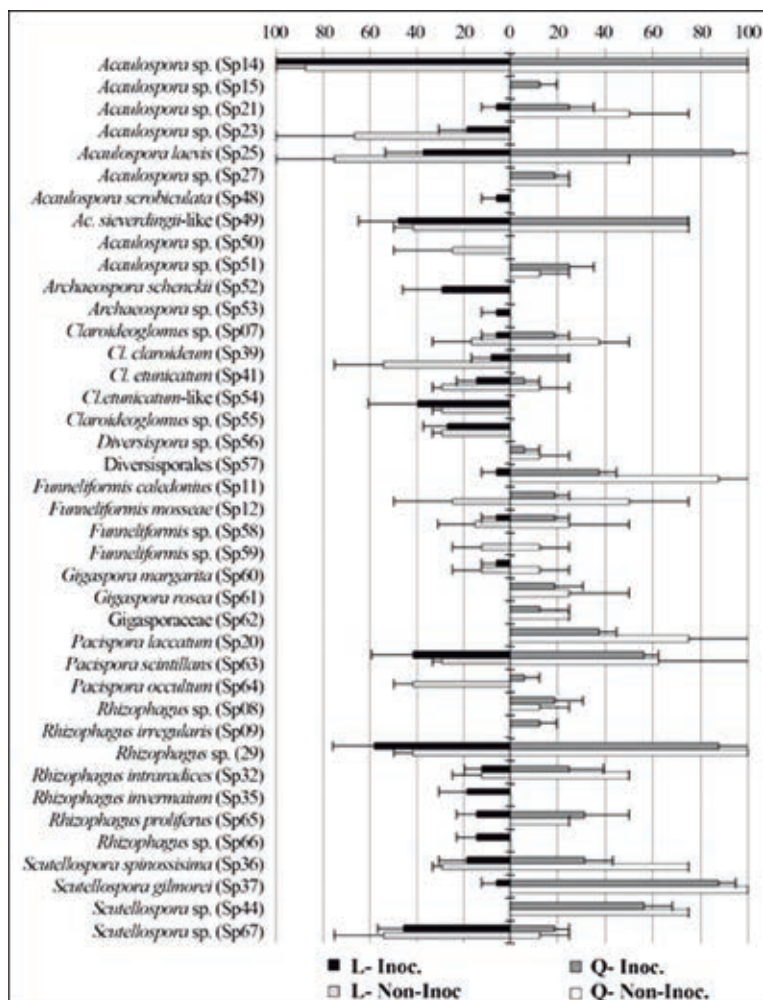


Figura 9.5. Resultados del estudio molecular de las comunidades de HMA asociadas a las raíces de papa. Las barras representan la frecuencia de ocurrencia de especies de HMA en Loja (L) y Quito (Q) en los tratamientos inoculados (Inoc.) y no inoculados (Non Inoc.) con *Rhizophagus irregularis* DAOM197198.

ambos cultivados con papa. Se evaluó su efecto en el desarrollo del hongo en las plantas inoculadas, así como en las comunidades de HMA asociadas. En ambos casos no se encontraron indicios que demuestren un efecto de la inoculación de *R. irregularis* DAOM 197198 en el crecimiento de las plantas, probablemente debido al activo movimiento del suelo para el cultivo de la papa que no permite el rápido establecimiento del hongo. Sin embargo, el estudio molecular de las comunidades de HMA asociadas a las raíces, que incluyó extracción de ADN, utilización de primers específicos (SSUmAf-

LSUmAr), el uso de 454 GS-FLX + sequencing y posterior análisis bioinformático, permitió descubrir una diversa comunidad nativa de HMA asociada al cultivo, encontrándose un total de 40 especies de HMA

9.2.2.2. Micorrizas en los bosques tropicales del Sur del Ecuador

En los trópicos, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) establecen una simbiosis no solo con especies agrícolas sino también con especies forestales. En el bosque tropical de montaña del sur del Ecuador, más del 90 % de las especies de árboles nativos están asociados con hongos micorrízicos y solamente muy pocos están asociados con ectomicorrizas. Se han encontrado varios otros tipos de micorrizas en Orchidaceae y Ericaceae y en algunas hepáticas. En un estudio realizado en la Reserva Biológica San Francisco (RBSF) del Parque Nacional Podocarpus (PNP), localizado a sólo una hora de distancia de la ciudad de Loja, se encontró que el 97 % de las especies arbóreas (187) forman HMA (Kottke and Haug, 2004). Con los datos obtenidos en estudios de aplicación de hongos micorrízicos en árboles nativos cultivados en el vivero forestal se diseñó un protocolo de uso de micorrizas para colaborar con los esfuerzos de reforestación de los bosques de Ecuador. Estas acciones surgieron de la necesidad de producir un inóculo de HMA para incrementar la producción y disminuir la mortalidad de las especies vegetales utilizadas en agricultura, horticultura o silvicultura. El inóculo se utilizó en la propagación de *Handroanthus chrysanthus* (Guayacán), *Cedrela montana* (cedrela) y *Heliocarpus americanus* (balsa) alcanzando una mortalidad menor al 10 % en el tratamiento de plantas inoculadas con un consorcio de HMA nativos. El consorcio de HMA estuvo compuesto por *Diversispora* sp., *Claroideoglosum* sp., *Archaeospora* sp., *Rhizophagus* sp., *Acaulospora* sp., *Dentiscutata savannicola*, *Rhizophagus irregularis*. Este protocolo puede usarse efectivamente en planes de reforestación (Urgiles, *et al.*, 2016).

Otros organismos, como las bacterias nitrificantes, se encuentran también asociadas con los HMA. Existe una simbiosis tripartita entre micorrizas arbusculares (HMA), ectomicorrizas (EM) y actinobacterias fijadoras de nitrógeno (N_2) en dos especies de árboles nativos de Ecuador, *Alnus acuminata* (aliso, Betulaceae) y *Morella pubescens* (sinónimo *Myrica pubescens*, laurel de cera, Myricaceae) (Figura 9.6). Estas dos especies se pueden utilizar para mejorar la calidad del suelo y para la forestación de áreas degradadas, debido a que el uso de plantas con raicillas micorrizadas incrementa el crecimiento y desarrollo de especies forestales (Urgiles, *et al.*, 2014). También se utilizan la *A. acuminata* y la *M. pubescens* como especies forestales de rápido crecimiento que se asocian a cultivos nativos en la región de los Andes del Ecuador y que desempeñan un papel ecológico y económico importante para los pueblos indígenas o nativos (Urgiles, *et al.*, 2016).



Figura 9.6. Asociación tripartita en la especie forestal nativa *Alnus acuminata* (aliso) con hongos micorrízicos arbusculares (HMA), hongos ectomicorrizas (ECM) como *Alnicola* spp., *Lactarius* spp. y actinomicetos como *Frankia alni* en la Sierra Sur de Ecuador.

9.2.2.3. Micorrizas en zonas riparias del Sur del Ecuador

En las zonas riparias de la región sur del Ecuador (Figura 9.7) existe poca investigación enfocada en la descripción de hongos HMA, o de de la aplicación de HMA como biofertilizantes (Urgiles, *et al.*, 2019). En los bosques naturales y zonas riparias ecuatorianas existe una organización vegetal heterogénea que se traduce en un gran número de especies conviviendo en un mismo espacio de suelo, por lo tanto, la posibilidad de encontrar en estas circunstancias asociaciones exitosas con diversas especies de HMA es alta (Enríquez, *et al.*, 2008). Hasta el momento se han encontrado HMA en los primeros 20 centímetros del perfil del suelo, especialmente de los géneros *Glomus* spp., *Scutellospora* spp., *Acaulospora* spp., *Gigaspora* spp. y *Rhizophagus* spp. (Urgiles-Gómez, *et al.*, 2020).

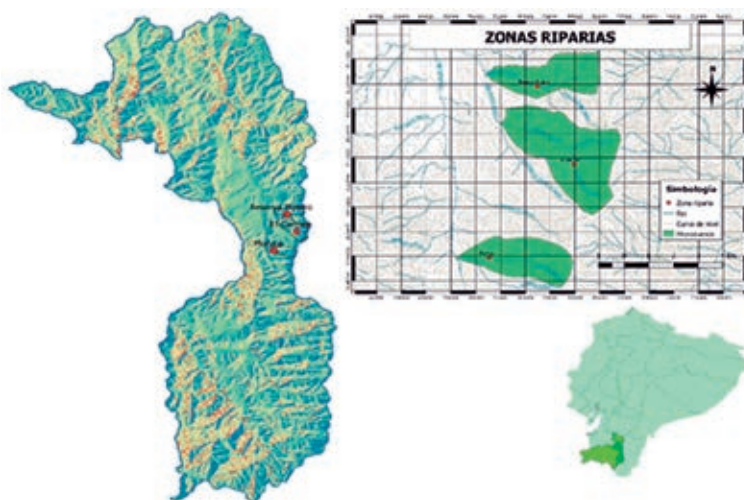


Figura 9.7. Ubicación de las zonas riparias en la provincia de Loja, Ecuador, donde existe la posibilidad de encontrar asociaciones de HMA con diversas especies vegetales.

Por otro lado, la aplicación de HMA en sistemas agrícolas y en sistemas forestales (a nivel de vivero y en plantaciones establecidas) podría ayudar a reducir el uso de fertilizantes químicos que por sus efectos residuales contaminan el ambiente (Urgiles, *et al.*, 2014; Loján, *et al.*, 2017). La investigación conducida por Urgiles, *et al.* (2019) en las zonas riparias de las microcuencas El Carmen (2 399 m s. n. m.) y Mónica (2 346

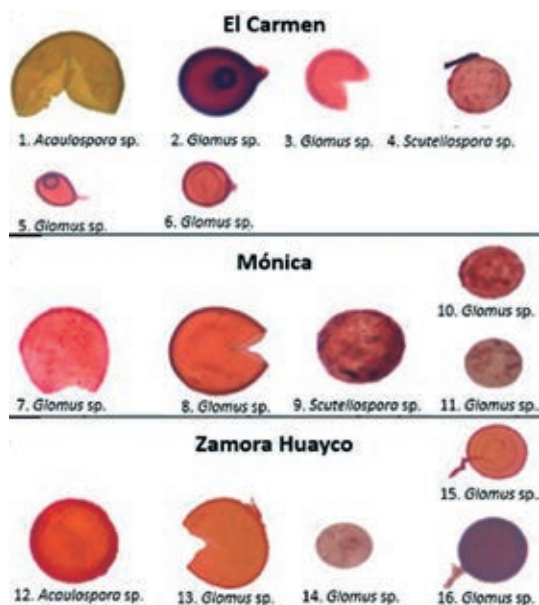


Figura 9.8. Hongos micorrízicos arbusculares aislados de zonas riparias de las microcuencas El Carmen, Mónica y Zamora Huaico en el cantón Loja, Ecuador.

m s. n. m.) en el cantón Loja, identificó los morfotipos de los géneros *Glomus*, *Acaulospora* y *Scutellospora* (Figura 9.8). Las esporas encontradas se utilizaron como bioinoculantes en plántulas de tomate de mesa (*Solanum lycopersicum* Mill). La inoculación de las plantas tuvo un efecto significativo en el crecimiento, producción de biomasa foliar y radicular y peso de los frutos respecto a las plantas no inoculadas (tratamiento testigo sin HMA). Se encontró que los HMA presentes en el bio inóculo o inoculantes microbianos de las zonas riparias son potencialmente adecuados para el desarrollo de bio-inoculantes, teniendo en cuenta que a medida que aumentan el número de especies vegetales en un área determinada crece la diversidad de HMA y hace que el uso de bioinoculantes sea viable y de beneficio para los cultivos agrícolas (Urgiles, *et al.*, 2014; Urgiles, *et al.*, 2016). La colonización de las raíces con HMA en fases tempranas del cultivo induce importantes cambios en la planta, principalmente respuestas de defensa en la planta hospedera que permiten superar el estrés biótico y abiótico (Noval-Pons, *et al.*, 2017).

9.2.2.4. Micorrizas en sistemas agroforestales asociadas al café en el Sur del Ecuador

Tradicionalmente, el cultivo de café (*Coffea arabica* y *Coffea canephora*) representa un rubro importante para la economía del Ecuador. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Ganadería, en las últimas décadas se ha establecido el café en sistemas agroforestales (SAF) (MAGAP, 2019) debido a que ofrecen condiciones adecuadas para conservar la biodiversidad y demás servicios del ecosistema (Jezeer and Verweij, 2015). Generalmente, este cultivo se encuentra asociado con leguminosas, como guaba o faique, y frutales como banano, pero también se asocia con árboles maderables y vegetación propia de la zona agroforestal, por esta razón, es importante conocer qué HMA interaccionan con el cultivo del café. A pesar de la importancia para el buen funcionamiento de los servicios ecosistémicos, existe poco conocimiento de las relaciones interespecíficas de los SAF con los microorganismos como las HMA y algunas BPCV en los suelos de plantaciones convencionales o tecnificadas de café.



Figura 9.9. Ubicación de las zonas de estudio de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) provenientes de SAF en la provincia de Loja, Ecuador.

El trabajo de caracterización morfológica de HMA procedentes de SAF asociados al cultivo de café conducido por Urgiles-Gómez, *et al.* (2020) en tres sitios de la zona productora de café de la provincia de Loja (Malacatos, Chaguarpamba y Lozumbe) (**Figura 9.9**), colectó muestras de suelo y raicillas de la rizósfera del café para la posterior extracción de esporas y caracterización de los morfotipos principales de HMA. En Malacatos se encontraron tres morfotipos y 284 esporas 100 g^{-1} suelo del género *Glomus*, mientras que en Chaguarpamba se encontraron 4 morfotipos y 313 esporas 100 g^{-1} de suelo, un morfotipo del género *Acaulospora* y tres del género *Glomus*, finalmente en Lozumbe se encontraron 4 morfotipos y 598 esporas 100 g^{-1} de suelo, un morfotipo del género *Acaulospora* tres del género *Glomus* (**Figura 9.10**). El número de esporas en los dos últimos sitios tiene relación con la diversidad florística que posee el cultivo del café dentro del SAF. La asociación con especies forestales, frutales y el manejo agronómico difieren en

cada sistema agroforestal asociado al café. En Lozumbe está asociado a una mayor diversidad de especies como banano (*Musa paradisiaca* L.), Guaba (*Inga edulis* Mart), Naranja (*Citrus x sinensis* L.), Porotillo (*Erythrina velutina* Willd), Fernán Sánchez (*Triplaris cumingiana* Fisher y Meyer), vegetación herbácea y arbustiva. En Chaguarpamba, está asociado con banano (*Musa paradisiaca* L.), Guayabo (*Psidium guajava* L) y Pico-Pico (*Acnistus arborescens* L.). Finalmente, en Malacatos el café está asociado con Aliso (*Alnus acuminata* Kunth) y vegetación herbácea.

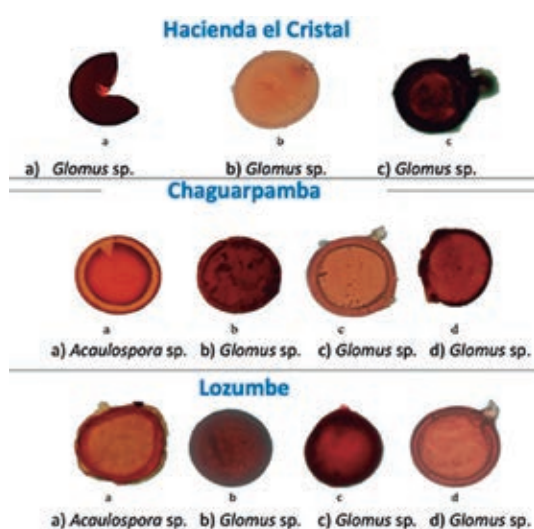


Figura 9.10. Hongos micorrízicos arbusculares aislados de sistemas agroforestales de Hacienda el Cristal (Malacatos), Chaguarpamba y Lozumbe en Loja, Ecuador.

Las comunidades y la población de las HMA pueden experimentar variación debido a efectos estacionales, la dinámica de esporulación entre las especies y el manejo agronómico en los ecosistemas y agroecosistemas (Trejo, *et al.*, 2011). Esto puede explicar la presencia del género *Acaulospora* en las zonas de Chaguarpamba y Lozumbe, lugares que presentan vegetación asociada a los cultivos de café con hábitos de crecimiento similares. A su vez, la diversidad de morfotipos y el número de esporas registrado

en cada zona tendría estrecha relación con la diversidad de vegetación asociada al cultivo de café. Estos autores también indican que es importante continuar con estudios de caracterización morfológica y molecular de las esporas de las HMA en los SAF asociados al café con la finalidad de identificar nuevas especies, determinar su rol ecológico y su aplicación como biofertilizantes, no solo en plantaciones convencionales de café sino en plantaciones tecnificadas en los SAF.

9.2.2.5. Micorrizas en palma aceitera

Estudios realizados por Maldonado, *et al.* (2008) y Bravo (2011) demostraron la presencia de consorcios de HMA nativos asociados a la rizósfera de todos los materiales genéticos (*Elaeis guineensis*, *E. oleifera*, *E. guineensis* x *E. oleifera* y variedades compactas) del cultivo de palma aceitera en el litoral y oriente ecuatorianos con tasas de colonización de hasta 73 % y densidad visual en raíces terciarias y cuaternarias de hasta 5.5 %. Los HMA encontrados pertenecen a los géneros *Glomus* spp., *Acaulospora* spp., *Archaeospora* spp. y *Gigaspora* spp., demostrando la prevalencia de HMA nativos en suelos agrícolas. Los autores destacan el hecho de que la zona donde se encontraron mayores porcentajes de asociación HMS-raíces está ubicada en la zona de producción de palma más antigua del país (Santo Domingo de los Tsáchilas), demostrando la alta capacidad de simbiosis de los HMA con este cultivo.

Es importante resaltar que son varios los factores edáficos y climáticos que afectan al comportamiento de los HMA en la palma aceitera, particularmente la buena correlación entre la cobertura vegetal de *Pueraria* sp. (leguminosa) y la tasa de colonización entre el contenido de materia orgánica del suelo y la densidad visual del endófito, mientras que existe una correlación negativa entre el contenido de P en el suelo y la población de esporas (Maldonado, *et al.*, 2008; Bernal, 2010; Bravo, 2011; Maldonado, *et al.*, 2013). Esta información es relevante para los programas de manejo de la palma aceitera que deben incluir coberturas vegetales, aporte de compost proveniente de los residuos del proceso industrial para incorporación MO al suelo y planes de fertilización equilibrados (Recalde y Calvache, 2009; Bernal, 2010).

Por otro lado, los estudios de la asociación de los HMA nativos en plantas de vivero de palma aceitera han demostrado el efecto benéfico de la inoculación en el incremento del área foliar específica y el contenido de P en los folíolos de las plantas lo que reduce la demanda de fertilizante fosforado (Morales y Bernal, 2008; Bernal, 2010; Maldonado, *et al.*, 2013).

9.2.2.6. Micorrizas en tomate de árbol

El tomate de árbol tiene mucha demanda en el país, pero la producción ha sido afectada por afecciones de plagas y mala nutrición del cultivo. Las plantas cujaco (*Solanum hispidium*) y tabaquillo (*Nicotiana glauca*) se utilizan como patrones para injertos de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.) para evitar los problemas sanitarios radiculares que afectan al cultivo. La inoculación con HMA podría potenciar el efecto de los patrones en la producción de este frutal. Un estudio conducido por Viera, *et al.* (2017) encontró cepas nativas de HMA en suelos de Mindo y de la Mitad del Mundo en la provincia de Pichincha que al inocularse a los porta injertos mencionados lograron una mayor colonización radicular y mayor concentración de P en el tejido vegetal. Adicionalmente, al comparar el inóculo de estas cepas con la micorriza comercial (*Glomus* sp.) se encontró que las cepas nativas tenían un mejor desempeño, demostrando el positivo efecto de la utilización HMA en la producción de frutales.

9.2.3. Necesidad de investigación en Micorrizas en suelos de sistemas agrícolas

Se ha demostrado que la presencia de un gran número de especies de HMA, en su mayoría en los sistemas agrícolas bajo labranza de conservación, genera condiciones que se reflejan en mejores índices de calidad del suelo. En consecuencia, es impostergable el continuar con la caracterización molecular de toda la microfauna presente en los suelos del Ecuador, asociadas a sistemas agrícolas o sistemas agroforestales y naturales, así como lo es la necesidad de estudiar y comprender las funciones de estos microorganismos y/o consorcios de microorganismos en el suelo.

9.3. Hongos antagonísticos: *Trichoderma* sp.

Entre los hongos antagonísticos en sistemas agroecológicos destaca el género *Trichoderma* como agente de control biológico de enfermedades ocasionadas por patógenos como *Fusarium*, *Phytophthora*, *Pythium* y *Rhizoctonia*. Entre las especies más conocidas e investigadas están *T. harzianum*, *T. hamatum*, *T. viride*, y *T. koningii* (Amerio, *et al.*, 2020). En los últimos años se ha conducido abundante investigación sobre el efecto del uso de *Trichoderma* en diversos cultivos, algunos ejemplos son arroz (Chávez, *et al.*, 2020), cacao (Solís y Suárez, 2004; Bailey, *et al.*, 2011), piña (Sabando-Ávila, *et al.*, 2017), aguacate (Sotomayor, *et al.*, 2019), mora de castilla (Viera, *et al.*, 2019), cebolla roja (Chauca, 2018) y pastos (Acurio y España, 2017).

El efecto del uso de *Trichoderma* en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) demostrado por Bravo, *et al.* (2016) es un buen ejemplo de la respuesta en un cultivo que ha tenido recurrentes problemas en el manejo agronómico debido al escaso desarrollo de sus raíces por causas bióticas y abióticas. Se evaluó el efecto enraizador del hongo anaerobio *Trichoderma asperellum* que habita naturalmente los suelos de las provincias de Esmeraldas y Santo Domingo de los Tsáchilas. Las pruebas de crecimiento y la caracterización morfológica molecular permitieron identificar al *Trichoderma asperellum* procedente de Mataje, San Lorenzo como el de mejor capacidad antagonística. Los resultados obtenidos en la fase de campo mostraron que el tratamiento con el *Trichoderma* de Mataje fue el que mejor incrementó el crecimiento y peso seco de las raíces de la palma. Este estudio recomienda el uso de *Trichoderma asperellum* combinado con raquis de palma para facilitar el crecimiento del microorganismo. Además, se aconseja aplicar esta combinación en los tres primeros años de crecimiento de la plantación a intervalos de seis meses para lograr el establecimiento del hongo en el suelo y el consiguiente efecto en la rizósfera de la planta.

Debido a su versatilidad, además de ser un estimulante del desarrollo de raíces, *Trichoderma* es un biocontrolador de hongos fitopatógenos. Se ha demostrado la capacidad antagonística y fungistática de varias cepas nativas de *Trichoderma* contra *Fusarium oxysporum* y *F. solani*, aislados de plantas de palma aceitera afectadas con pudrición de collogo. Las pruebas *in vitro* mostraron fungistasis a los 3 días después de la siembra de *Trichoderma* y parasitismo a los 7 (Martínez, *et al.*, 2013).

9.4. Organismos eucariotas simples: Protozoos

Otro grupo de microorganismos que casi no se ha estudiado en el país es el de los protozoos del suelo. Los protozoos son una gama extremadamente diversa de organismos eucariotas simples o unicelulares que viven en casi todos los hábitats (Imam, 2009). La gran mayoría de estos microorganismos son heterótrofos o quimioheterótrofos, es decir, obtienen su energía de fuentes orgánicas preformadas que puede ser en forma de moléculas orgánicas solubles, bacterias o detritos. Sin embargo, algunos pueden poseer cloroplastos y obtener así parte de su energía del sol siendo fotoautótrofos, pero otros pueden ser fotoheterótrofos, que aunque son fototrópicos en cuanto a necesidades energéticas, no pueden utilizar dióxido de carbono (CO₂) para la síntesis celular y deben tener al alcance compuestos orgánicos de carbono (Laybourn-Parry, 1984).

Los protozoos del suelo incluyen amebas desnudas, amebas testadas, flagelados, ciliados, microsporidios y esporozoos. Se han registrado alrededor de 1 600 especies del suelo y dependiendo de su tipo, varían en número de protozoos, de 10 000 a 1 000 000 individuos por gramo de masa seca de suelo. Los protozoos tienen funciones importantes en el ciclo de descomposición y el crecimiento de las plantas y son valiosos bioindicadores de las influencias naturales y antropogénicas (Foissner, 2014). Los géneros y especies más comunes de protozoos micófagos del suelo son *Drechmeria coniospora*, *Protaspis simplex*, o *Cercomonas crassicauda* (Ekelund, 1998).

Los protozoos juegan un papel importante en los suelos agrícolas como consumidores de bacterias y, en menor medida, como consumidores de hongos. Se ha demostrado en experimentos en maceta que la actividad de los protozoos estimula la absorción de N y se ha planteado la hipótesis de que la materia orgánica liberada por las plantas en la zona de las raíces estimula la actividad bacteriana y protozoaria, lo que conduce a la mineralización del N orgánico del suelo, que es posteriormente absorbido por las plantas (Hamer, *et al.*, 2009; Vaerewijck and Houf, 2015).

9.5. Microorganismos y sus servicios ecosistémicos

El Ecuador es un país que se caracteriza por una gran diversidad de plantas y animales, muchos de ellos endémicos, razón por la cual es considerado como uno de los 17 países más megadiversos del mundo (SENPLADES, 2013). Esta riqueza de especies es una fuente de valiosos recursos para la comunidad científica en sus diversas áreas de investigación. Se han hecho varios avances y aportes científicos en ciertas áreas como la conservación de áreas naturales, pero cabe recalcar, sin embargo, que los avances en el contexto de la microbiología del suelo, incluyendo la microbiología agrícola, son todavía escasos y merecen ampliación. Los microorganismos del suelo participan constante y activamente en diferentes procesos vitales del suelo y son los principales promotores de la transformación de la materia orgánica y de la estabilidad de los ciclos biogeoquímicos (Bernal, 2006). Los estudios recientes en microorganismos benéficos en Ecuador se detallan en el **Cuadro 9.2**.

Cuadro 9.2. Investigaciones desarrolladas con microorganismos en ecosistemas naturales y agroecosistemas del Ecuador.

Microorganismos	Autores	Año	Tema de la publicación	DOI - URL
Microalgas	Bravo, Vladimir; Ronquillo, Mayra; Martínez, Miguel; Quezada, Gonzalo	2016	Efecto enraizador de <i>Trichoderma asperellum</i> en el cultivo de palma aceitera	https://doi.org/10.36331/revista.v4i1.26
Microalgas	Morales, Ever; Luna, Verónica; Navarro, Lucía; Santana, Vismeli; Gordillo, Ana; Arévalo, Andrés	2013	Diversidad de microalgas y cianobacterias en muestras provenientes de diferentes provincias del Ecuador, destinadas a colección de cultivos	https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6537243
PGPR - <i>Azotobacter</i> spp. y <i>Trichoderma</i> spp.	Granda, Klever; Araujo, Salomé, Collahuazo, Yadira; López, Yessenia; Jaén, Ximena; Robles, Ángel; Urgiles, Narcisca	2020	Caracterización morfológica y fisiológica de microorganismos rizosféricos nativos de sistemas agroforestales de café	https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/832
<i>Bacillus</i> spp. <i>Lactobacillus</i> spp.	Álvarez, Manuel; Vázquez, Jacinto; Castillo, Jorge; Tucta, Franz; Quispe, Evelyn; Meza, Víctor	2018	Potencial de la flora de la provincia del Azuay (Ecuador) como fuente de microorganismos benéficos	http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.12
Diversidad de <i>Rhizobium</i> en <i>Phaseolus vulgaris</i>	Torres, Roldán; Granda, Klever; Bazantes, Cassandra; Robles, Ángel	2021	<i>Rhizobium</i> diversity is the key to efficient interplay with <i>Phaseolus vulgaris</i> . Case of study of southern Ecuador	https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-8999-7_19#citeas
Biofertilizantes de PGPR para incrementar la producción de brócoli y lechuga	Acurio, Ramiro; Mamarandiyi, Johanna; Ojeda, Andrea; Tenorio, Estefany; Chiluisa, Viviana; Vaca, Ivonne	2020	Evaluación de <i>Bacillus</i> spp. como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) en brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>) y lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1465
Estudios realizados en PGPR y HMA en la producción de café	Urgiles, Narcisca; Avila, María Eugenia; Loján, Paul; Encalada, Max; Hurtado, Lesly; Araujo, Salome; Collahuazo, Yadira; Guachanamá, José.; Poma, Noemí.; Granda, Klever; Robles, Ángel; Senés, Carolina; Cornejo, Pablo	2021	Plant Growth-Promoting Microorganisms in Coffee Production: From Isolation to Field Application	https://doi.org/10.3390/agronomy11081531
HMA en bosques tropicales en el sur del Ecuador	Urgiles, Narcisca; Haug, Ingeborg; Setaro, Sabrina; Aguirre, Nikolay	2016	Introduction to Mycorrhizas in the tropics with emphasis on the montane forest in Southern Ecuador	https://www.researchgate.net/publication/306082812
Inóculo de HMA en especies nativas forestales para la reforestación	Urgiles, Narcisca; Loján, Paúl; Aguirre, Nikolay; Blaschke, Helmut; Günte, Svenr; Stimm, Bernd; Kottke, Ingrid	2009	Application of mycorrhizal roots improves growth of tropical tree seedlings in the nursery: a step towards reforestation with native species in the Andes of Ecuador	https://doi.org/10.1007/s11056-009-9143-x

Microorganismos	Autores	Año	Tema de la publicación	DOI - URL
HMA en sistemas agroforestales	Urgiles, Narcisa; Guachanamá, José; Granda, Iván; Robles, Ángel; Encalada, Max; Loján, Paúl; Ávila, María Eugenia; Hurtado, Leslye; Poma, Nohemí, Collahuazo, Yadira; Araujo, Salomé; Quichimbo, Lucía	2020	Caracterización morfológica de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al café en sistemas agroforestales de Loja, Ecuador	https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/826
Diversidad filogenética de HMA para mejorar el crecimiento de forestales	Schüßler, Arthur; Belz, Claudia; Urgiles, Narcisa	2016	Phylogenetically diverse AM fungi from Ecuador strongly improve seedling growth of native potential crop trees	https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00572-015-0659-y
Inóculo de HMA en raicillas de especies nativas forestales	Urgiles, Narcisa; Strauß, Axel; Loján, Paúl; Schüßler, Arthur	2010	Cultured arbuscular mycorrhizal fungi and native soil inocula improve seedling development of two pioneer trees in the Andean region	https://doi.org/10.1007/s11056-014-9442-8
HMA asociados al cultivo de la papa	Loján, Paul; Senés, Carolina; Suárez, Juan; Kromann, Peter; Schüßler, Arthur; Declerck, Stéphane	2017	Potato field-inoculation in Ecuador with <i>Rhizophagus irregularis</i> : no impact on growth performance and associated arbuscular mycorrhizal fungal communities	https://doi.org/10.1007/s13199-016-0471-2
HMA como biofertilizante	Urgiles, Narcisa; Lalangui, Christian; Chamba, Estenia; Loján, Paúl; Poma, Laura; Encalada, Max; Mendoza, Nikolay	2019	Aislamiento y caracterización morfológica de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) de zonas riparias del Sur del Ecuador: un enfoque a la producción de biofertilizantes	https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/700

Los mayores limitantes para una producción agrícola sostenible y eficiente en Ecuador son la degradación de los ecosistemas y la contaminación de los suelos (Prieto-Benavides, *et al.*, 2012). La utilización de microorganismos benéficos (BPCV, HMA, protozoos, etc.) es una alternativa viable para que optimizar la producción agrícola (campo e invernaderos) debido a que éstos mejoran la nutrición de las plantas (captación y transporte de nutrientes), así como su capacidad para combatir el estrés por falta de agua y para inducir resistencia a ciertas plagas o patógenos (Singh, *et al.*, 2004; Barea, *et al.*, 2013). Estos servicios ecosistémicos generalmente se subestiman al parecer inciertos o por desconocer su real potencial, por esta razón, es necesario ampliar la investigación sobre la dinámica de estos microorganismos y evaluar sus beneficios en campos de agricultores. Es también importante evaluar la capacidad de remediación ambiental de estas comunidades microbianas (Saccá, *et al.*, 2017). La **Figura 9.11** sintetiza algunos de los roles de los microorganismos del suelo y los servicios ecosistémicos brindados.

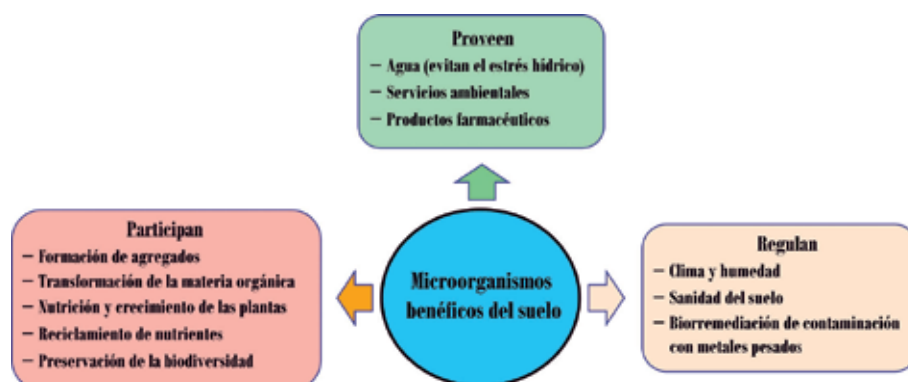


Figura 9.11. Servicios ecosistémicos de los microorganismos del suelo (modificado de Saccá, *et al.* (2017).

9.6. Conclusiones y perspectivas futuras

La investigación científica ha demostrado que los microorganismos benéficos son actores claves en el mantenimiento o la recuperación de la calidad del suelo, particularmente por su rol fundamental de indicadores tempranos de perturbaciones o cambios en los ecosistemas agrícolas y forestales.

Las BPCV, HMA, hongos antagonistas, microalgas y protozoos son parte de una gran cadena trófica de microorganismos que benefician los sistemas agrícolas y forestales aportando de esta forma a la seguridad alimentaria del mundo. Por lo tanto, el determinar los procesos físicos, químicos y biológicos en los cuales estos microorganismos interactúan podría significar la propia subsistencia de la especie humana en este planeta.

Las nuevas investigaciones conducidas en Ecuador a nivel molecular y bioquímico han logrado dilucidar en parte la biodiversidad de los suelos del país, sin embargo, en los ecosistemas ecuatorianos existe todavía un gran número de especies de microorganismos cuyas funciones e importancia deben investigarse para expandir el conocimiento sobre la mega diversidad de microorganismos benéficos. Esta investigación puede demostrar cual es el verdadero aporte de estos organismos a la conservación y recuperación de los suelos, así como su efecto sobre la productividad y calidad de los cultivos, contribuyendo al mejoramiento de la calidad de vida y la economía de los productores.

Los estudios a mediano y largo plazo deben ser integrales, es decir, se debe investigar la interacción de los microorganismos benéficos con las propiedades físicas, químicas y biológicas de diferentes tipos de suelos y la interacción microbiana con los cultivos, priorizando la protección y restauración del recurso suelo en ecosistemas agrícolas y forestales. Se debe fomentar el uso de tecnologías y herramientas moleculares de nueva generación para determinar la efectividad y promover decididamente el uso de microorganismos benéficos nativos como aporte para la ciencia y para una alimentación sana.

Además, se debe trabajar a nivel de legislación ambiental para reforzar las políticas que fomenten la protección de la diversidad microbiana del suelo a través de la rotación y la eficiente nutrición de los cultivos, así como el uso de biofertilizantes, biotransportadores de nutrientes y controladores biológicos de plagas o enfermedades.

9.7. Referencias bibliográficas

- Acurio, R. y C. España. 2017. Aislamiento, caracterización y evaluación de *Trichoderma* spp. como promotor de crecimiento vegetal en pasturas de raygrass (*Lolium perenne*) y trébol blanco (*Trifolium repens*). La Granja. Revista de Ciencias de la Vida 25(1): 53-61.
- Ahemad, M. and M. Kibret. 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. Journal of King Saud University-Science 26(1): 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>
- Amerio, N., M. Castrillo, G. Bich, P. Zapata y L. Villalba. 2020. *Trichoderma* en Argentina: Estado del arte. Ecología Austral 30: 113-124. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/131788>
- Ávila-Salem, M., F. Montesdeoca, M. Orellana, K. Pacheco, S. Alvarado, N. Becerra, C. Marín, F. Borie, P. Aguilera and P. Cornejo. 2020. Soil biological properties and arbuscular mycorrhizal fungal communities of representative crops established in the Andean Region from Ecuadorian Highlands. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 20: 2156–2163. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00283-1>

- Babushkina, E., L. Belokopytova, A. Grachev, D. Meko and E. Vaganov. 2017. Variation of the hydrological regime of Bele-Shira closed basin in Southern Siberia and its reflection in the radial growth of *Larix sibirica*. *Regional Environmental Change* 17(6): 1725-1737. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1137-1>
- Bailey, B., H. Bae, R. Melnick and J. Crozier. 2011. The endophytic *Trichoderma hamatum* isolate DIS 219b enhances seedling growth and delays the onset of drought stress in *Theobroma cacao*. In: A. Pirittla and a. Frank (eds). *Endophytes of Forest Trees*. *Forestry Science*, vol 80. Springer. Dordrecht, Holland. p. 157-172.
- Barea, J., M. Pozo, R. Azcón and C. Azcón-Aguilar. 2013. Microbial interactions in the rhizosphere. In: F. de Bruijn (ed). *Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere*. John Wiley & Sons, Ltd. New York, USA. p. 29-44.
- Bernal, G. 2004. Informe final del Proyecto PROMSA IQ-CV-081: Selección de cepas de *Rhizobium* adaptadas a condiciones de campo y su uso como inoculantes de leguminosas de la Sierra y Costa Ecuatoriana. Departamento de Protección Vegetal. Estación Experimental Santa Catalina. INIAP. Quito, Ecuador.
- Bernal, G. 2010. El desarrollo de la microbiología del suelo en la palma de aceite en Ecuador. *Palmas* 31 N° Especial (1): 226-233.
- Bernal, G. 2022. Comunicación personal. Quito, Ecuador.
- Bernal, G. 2006. La microbiología de suelos en el Ecuador: Situación actual de la investigación. En: J. Espinosa (ed). *Memorias del X Congreso de la Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo*. SECS. Guayaquil, Ecuador.
- Bernal, G. and P. Graham. 2001. Diversity in the *rhizobia* associated with *Phaseolus vulgaris* L. in Ecuador, and comparisons with Mexican bean *rhizobia*. *Canadian journal of microbiology* 47(6): 526-534. <https://doi.org/10.1139/w01-037>
- Bertolini, V., N. Montaña, E. Chimal-Sánchez, L. Varela-Fregoso, J. Gómez-Ruiz y J. Martínez-Vázquez. 2018. Abundancia y riqueza de hongos micorrizógenos arbusculares en cafetales de Soconusco, Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical* 66(1): 91-105. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i1.27946>
- Brady, N. and R. Weil. 2008. *An Introduction to the Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall. USA.
- Bravo, V. 2011. Evaluación de consorcios simbióticos micorrízicos nativos de palma aceitera (*Elaeis guineensis* J.), reproducidos como bioinoculantes para el estudio de su eficiencia en fase de vivero. Departamento de Ciencias de la Viva. Facultad de Ingeniería en Biotecnología, Escuela Politécnica del Ejército. Ingeniero en Biotecnología. Sangolquí, Ecuador. 98 p
- Bravo, V., M. Ronquillo, M. Martinez y G. Quezada. 2016. Efecto enraizador de *Trichoderma asperellum* en el cultivo de palma aceitera. Ecuador es Calidad: Revista Científica Ecuatoriana. Edición Especial de Suelos 4(1): 1-8. <https://doi.org/10.36331/revista.v4i1.26>
- Chauca, E. 2018. Evaluación de la capacidad antagónica de *Trichoderma* spp. frente al hongo *Rhizoctonia solani* en *Allium cepa* L (Cebolla Roja). Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ingeniero en Biotecnología. Riobamba, Ecuador. 111 p
- Chávez, J., A. García, E. Espinoza y D. Zambrano. 2020. Respuestas morfofisiológicas de la raíz del arroz (*Oryza sativa* L.) variedad SFL 11 en fase de semillero a la aplicación de cepa nativa de *Trichoderma* sp. y lixiviados de vermicompost bovino. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*. ISSN 2477-8982 23: 13-24.

- Coleman, G., A. Davín, T. Mahendrarajah, L. Szánthó, A. Spang, P. Hugenholtz, G. Szöllösi and T. Williams. 2021. A rooted phylogeny resolves early bacterial evolution. *Science* 372(6542): 1-17. <https://doi.org/10.1126/science.abe0511>
- De Beenhouwer, M., M. Van Geel, T. Ceulemans, D. Muleta, B. Lievens and O. Honnay. 2015. Changing soil characteristics alter the arbuscular mycorrhizal fungi communities of Arabica coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia across a management intensity gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 91: 133-139.
- Debouck, D., O. Toro, O. Paredes, W. Johnson and P. Gepts. 1993. Genetic diversity and ecological distribution of *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae) in northwestern South America. *Economic Botany* 47(4): 408-423. <https://doi.org/10.1007/bf02907356>
- Desai, S., G.P. Kumar, L.D. Amalraj, D. Bagyaraj and R. Ashwin. 2016. Exploiting PGPR and AMF biodiversity for plant health management. In: D. Prtap, H. Bahadur and R. Prabha (eds). *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity*. Springer. New Delhi, India. p. 145-160.
- Ekelund, F. 1998. Enumeration and abundance of mycophagous protozoa in soil, with special emphasis on heterotrophic flagellates. *Soil Biology and Biochemistry* 30(10-11): 1343-1347.
- Enríquez, F., L. Núñez y F. Paillacho. 2008. Evaluación de la efectividad de las micorrizas arbusculares nativas sobre el desarrollo y estado nutritivo del palmito (*Bactris gasipaes* Kunt) en etapa de vivero. En: J. Espinosa (ed). *Memorias del XI Congreso Ecuatoriano de Ciencias del Suelo*. SECS. Quito, Ecuador.
- Foissner, W. 2014. An update of 'basic light and scanning electron microscopic methods for taxonomic studies of ciliated protozoa'. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 64(Pt_1): 271-292.
- González, H. y R. Fierro. 2009. ¿Sabías que existen microorganismos que no hemos podido cultivar? *Contactos* 71: 42-45.
- Hamer, U., K. Potthast and F. Makeschin. 2009. Urea fertilisation affected soil organic matter dynamics and microbial community structure in pasture soils of Southern Ecuador. *Applied Soil Ecology* 43(2-3): 226-233.
- Imam, T. 2009. The complexities in the classification of protozoa: a challenge to parasitologists. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences* 2(2): 159-164. <https://doi.org/10.4314/bajopas.v2i2.63805>
- Jezeer, R. y P. Verweij. 2015. *Café en Sistema Agroforestal. Doble Dividendo para la Biodiversidad y los Pequeños Agricultores en Perú*. Hivos. El Haya, Holanda.
- Kottke, I. and I. Haug. 2004. The significance of mycorrhizal diversity of trees in the tropical mountain forest of southern Ecuador. *Lyonia* 7(1): 49-56.
- Laybourn-Parry, J. 1984. *A Functional Biology of Free-Living Protozoa. How Protozoa Obtain Energy*. Springer. London. England.
- Loján, P., C. Senés-Guerrero, J. Suárez, P. Kromann, A. Schüßler and S. Declerck. 2017. Potato field-inoculation in Ecuador with *Rhizophagus irregularis*: no impact on growth performance and associated arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Symbiosis* 73(1): 45-56.
- Louca, S., F. Mazel, M. Doebeli and L.W. Parfrey. 2019. A census-based estimate of Earth's bacterial and archaeal diversity. *PLoS Biology* 17(2): e3000106. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000106>
- Madigan, M., J. Martinko, P. Dunlap and D. Clark. 2008. *Brock Biology of Microorganisms*. 12th ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA.

- MAGAP. 2019. MAGAP ejecuta proyecto de reactivación de la caficultura Ecuatoriana. Disponible en <https://www.agricultura.gob.ec/magap-ejecuta-proyecto-de-reactivacion-de-la-caficultura-ecuatoriana/>
- Maldonado, L., V. Bravo, R. Morales and G. Bernal. 2013. Native mycorrhizal association in oil palm (*Elaeis guineensis*) in Ecuador and evaluation of colonization efficiency in nursery palms. *ASD Oil Palm Papers* 41: 23-26.
- Maldonado, L., R. Morales, G. Bernal y I. Alcocer. 2008. Estudio del comportamiento de las asociaciones micorrízicas en el material germoplásmico de palma aceitera en Ecuador. En: J. Espinosa (ed). *Memorias del XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador.
- Martínez, M., G. Quesada, K. Solís, V. Bravo y C. Suárez. 2013. Mejore las raíces de su palma usando *Trichoderma*. ANCUPA. Quito, Ecuador.
- Mohammadi, K., S. Khalesro, Y. Sohrabi and G. Heidari. 2011. A review: beneficial effects of the mycorrhizal fungi for plant growth. *J. Appl. Environ. Biol. Sci* 1(9): 310-319.
- Montesdeoca, F., M. Ávila, J. Quishpe, F. Borie, P. Cornejo, P. Aguilera, S. Alvarado and J. Espinosa. 2020. Early changes in the transition from conventional to no-tillage in a volcanic soil cultivated with beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 36(3): 181-189. <https://doi.org/10.29393/chjaas36-16ctfm80016>
- Morales, R. y G. Bernal. 2008. Estudio del comportamiento micorrízico en el cultivo de la palma aceitera en la zona de Quinindé, Ecuador. En: J. Espinosa (ed). *Memorias del X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. SECS. Quito, Ecuador.
- Noval-Pons, B., O. León-Díaz, N. Martínez-Gallardo, E. Pérez-Ortega y J. Délano-Frier. 2017. Patrón de la actividad de las β -1, 3-glucanasas y quitinasas en la interacción hma-sistemia en tomate. II fase temprana de la simbiosis. *Cultivos Tropicales* 38(3): 36-43.
- Pieterse, C., C. Zamioudis, R. Berendsen, D. Weller, S. Van Wees and P. Bakker. 2014. Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual review of phytopathology* 52: 347-375.
- Prieto-Benavides, O., C. Belezaca-Pinargote, W. Mora-Silva, F. Garcés-Fiallos, F. Sabando-Ávila and P. Cedeño-Loja. 2012. Identification of arbuscular mycorrhizal fungi in cocoa agroforestry systems in the Ecuadorian humid tropics. *Agronomía Mesoamericana* 23(2): 233-239. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/>
- Recalde, F. y M. Calvache. 2009. Importancia de la aplicación de raquis en el manejo de la corona del cultivo de palma aceitera: su efecto en la absorción del potasio. *Revista ANCUPA* 4: 1-11.
- Redecker, D., R. Kodner and L. Graham. 2000. Glomalean fungi from the Ordovician. *Science* 289(5486): 1920-1921. <https://doi.org/10.1126/science.289.5486.1920>
- Ribeiro, R., T. Martins, E. Ormeño-Orrillo, J. Delamuta, M. Rogel, E. Martínez-Romero and M. Hungria. 2015. *Rhizobium ecuadorensis* sp. nov., an indigenous N₂-fixing symbiont of the Ecuadorian common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genetic pool. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 65(Pt_9): 3162-3169. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.000392>
- Ribeiro, R., E. Ormeno-Orrillo, R. Dall'Agnol, P. Graham, E. Martinez-Romero and M. Hungria. 2013. Novel *Rhizobium* lineages isolated from root nodules of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Andean and Mesoamerican areas. *Research in Microbiology* 164(7): 740-748. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2013.05.002>

- Romero, G. y G. Bernal. 2008. Selección de cepas de la bacteria fijadora de nitrógeno e inoculación de la semilla de pueraria asociada con la palma aceitera (*Elaeis guineensis* J.). En: J. Espinosa (ed). Memorias del X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. SECS. Quito, Ecuador.
- Rout, M. and D. Southworth. 2013. The root microbiome influences scales from molecules to ecosystems: the unseen majority. *American Journal of Botany* 100(9): 1689-1691.
- Sabando-Ávila, F., L. Molina-Atiencia and F. Garcés-Fiallos. 2017. *Trichoderma harzianum* in pre-planting increases the agronomic potential of pineapple crop. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)* 12(4): 410-414.
- Saccá, M., A. Barra, M. Di Lenola and P. Grenni. 2017. Ecosystem services provided by soil microorganisms. In: M. Lukac, P. Grenni and M. Gamboni (eds). *Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience*. Springer. Bari, Italy. p. 9-24.
- Schüßler, A., C. Krüger and N. Urgiles. 2016. Phylogenetically diverse AM fungi from Ecuador strongly improve seedling growth of native potential crop trees. *Mycorrhiza* 26(3): 199-207.
- Schüßler, A., D. Schwarzott and C. Walker. 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research* 105(12): 1413-1421. <https://doi.org/10.1017/S0953756201005196>
- SENPLADES. 2013. Plan Nacional del Buen Vivir. SENPLADES. Quito, Ecuador. <https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/PLAN-NACIONAL-PARA-EL-BUEN-VIVIR-2013-2017.pdf>
- Serrano, L., A. Moreno, D. Castillo, J. Bonilla, C. Romero, L. Galarza and J. Coronel-León. 2021. Biosurfactants synthesized by endophytic bacillus strains as control of *Moniliophthora perniciosa* and *Moniliophthora roreri*. *Scientia Agricola* 78: e20200172. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0172>
- Singh, B., P. Millard, A. Whiteley and J. Murrell. 2004. Unravelling rhizosphere-microbial interactions: opportunities and limitations. *Trends in Microbiology* 12(8): 386-393.
- Smith, S. and D. Read. 2010. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press. New York, USA.
- Solís, K. y C. Suárez. 2004. Uso de *Trichoderma* spp para control del complejo Moniliasis Escoba de Bruja del cacao en Ecuador. Estación Experimental Tropical Pichilingue, INIAP. Quevedo, Ecuador.
- Sotomayor, A., A. Gonzáles, K.J. Cho, A. Villavicencio, T. Jackson and W. Viera. 2019. Effect of the application of microorganisms on the nutrient absorption in avocado (*Persea americana* Mill.) seedlings. *Journal of the Korean Society of International Agriculture* 31(1): 17-24.
- Torres-Gutiérrez, R., K. Granda-Mora, Y. Alvarado-Capó, A. Rodríguez, N. Mogollón and J. Almeida. 2017. Genetic and phenotypic diversity of Rhizobium isolates from Southern Ecuador. *Ciência e Agrotecnologia* 41: 634-647. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017416008517>
- Trejo, D., R. Ferrera-Cerrato, R. Garcia, L. Varela, L. Lara and A. Alarcon. 2011. Effectiveness of native arbuscular mycorrhizal fungi consortia on coffee plants under greenhouse and field conditions. *Revista Chilena de Historia Natural* 84(1): 23-31. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000100002>
- Urgiles-Gómez, N., M. Avila-Salem, P. Loján, M. Encalada, L. Hurtado, S. Araujo, Y. Collahuazo, J. Guachanamá, N. Poma and K. Granda. 2021. Plant growth-promoting microorganisms in coffee production: from Isolation to field application. *Agronomy* 11(8): 1531.
- Urgiles-Gómez, N., J. Guachanamá-Sánchez, I. Granda-Mora, Á. Robles-Carrión, M. Encalada-Cordova, P. Loján-Armijos, M. Avila-Salem, L. Hurtado-Trejo, N. Poma-López e Y. Collahuazo-Reinoso. 2020. Caracterización morfológica de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al café en sistemas agroforestales de la provincia de Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero* 10(2): 137-145.

- Urgiles, N., I. Haug, S. Setaro and N. Aguirre. 2016. Introduction of Mycorrhizas in the Tropics with emphasis on the Montane Forest in Southern Ecuador. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.
- Urgiles, N., C. Lalangui, E. Chamba, P. Loján, L. Poma, M. Encalada y N. Aguirre. 2019. Aislamiento y caracterización morfológica de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) de zonas riparias del Sur del Ecuador: un enfoque a la producción de biofertilizantes. CEDAMAZ, Revista del Centro de Estudio y Desarrollo de la Amazonía 9(1): 1-7.
- Urgiles, N., A. Strauß, P. Loján and A. Schüßler. 2014. Cultured arbuscular mycorrhizal fungi and native soil inocula improve seedling development of two pioneer trees in the Andean region. *New Forests* 45(6): 859-874. <https://doi.org/10.1007/s11056-014-9442-8>
- Vaerewijck, M. and K. Houf. 2015. The role of free-living protozoa in protecting foodborne pathogens. In: J. Sofos (ed). *Advances in Microbial Food Safety*. Elsevier. New York, USA. p. 81-101.
- Velivelli, S., P. Kromann, P. Lojan, M. Rojas, J. Franco, J. Suarez and B. Prestwich. 2015. Identification of mVOCs from Andean rhizobacteria and field evaluation of bacterial and mycorrhizal inoculants on growth of potato in its center of origin. *Microbial Ecology* 69(3): 652-667. <https://doi.org/10.1007/s00248-014-0514-2>
- Viera, W., D. Campaña, A. Lastra, W. Vásquez, P. Viteri y A. Sotomayor. 2017. Micorrizas nativas y su efecto en dos portainjertos de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.). *Bioagro* 29(2): 105-114.
- Viera, W., M. Noboa, A. Martínez, F. Báez, R. Jácome, L. Medina and T. Jackson. 2019. *Trichoderma asperellum* increases crop yield and fruit weight of blackberry (*Rubus glaucus*) under subtropical Andean conditions. *Vegetos* 32(2): 209-215.
- Yarzabal, L. and E. Chica. 2021. Microbial-based technologies for improving smallholder agriculture in the ecuadorian Andes: Current situation, challenges, and prospects. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5(5): 617444. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617444>

SUELOS DEL ECUADOR CLASIFICACIÓN, USO Y MANEJO



Síguenos en:



CONTACTOS:

- Dirección: (593-2) 3 975 100 est. 2102
- Subdirección: (593-2) 3 975 100 est. 2109
- Geoinformación: (593-2) 3 975 100 est. 4448
- Mercadotecnia: (593-2) 3 975 100 est. 2509/2517
- Comunicación Social: (593-2) 3 975 100 est. 2505/2506
- Pbx: (593-2) 3 975 100

Quito: Av. Seniergues E4-676 Y Gral. T. Paz y Miño - El Dorado

Instituto Geográfico Militar

www.geograficomilitar.gob.ec / www.geoportal.gob.ec

ISBN: 978-9942-22-557-3



9 789942 225573

