



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.

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).

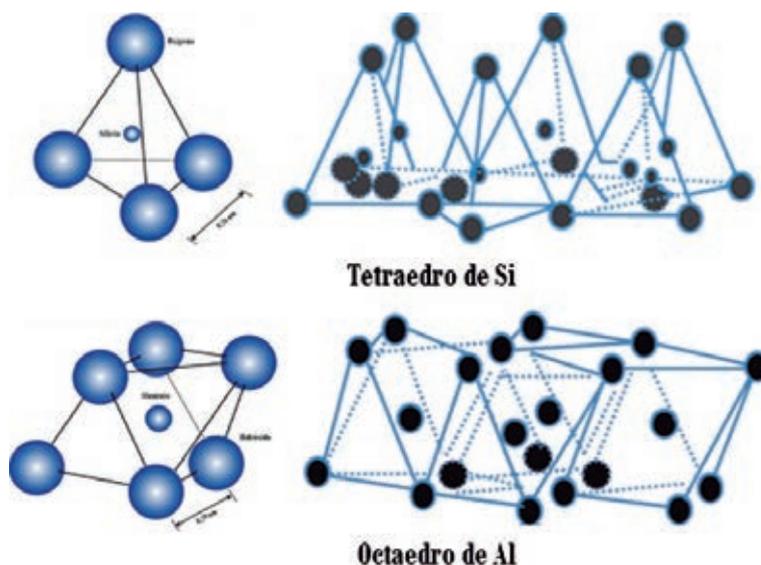


Figura 8.1. Estructuras básicas de los aluminosilicatos (arcillas laminares). Adaptado de Kodama (2012) y Nanzyo and Kanno (2018).

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 (esmeclitas) 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) (Nanzyo and Kanno, 2018). Una descripción de la estructura de las arcillas y del proceso de desilificación se presenta en la **Figura 8.2**.

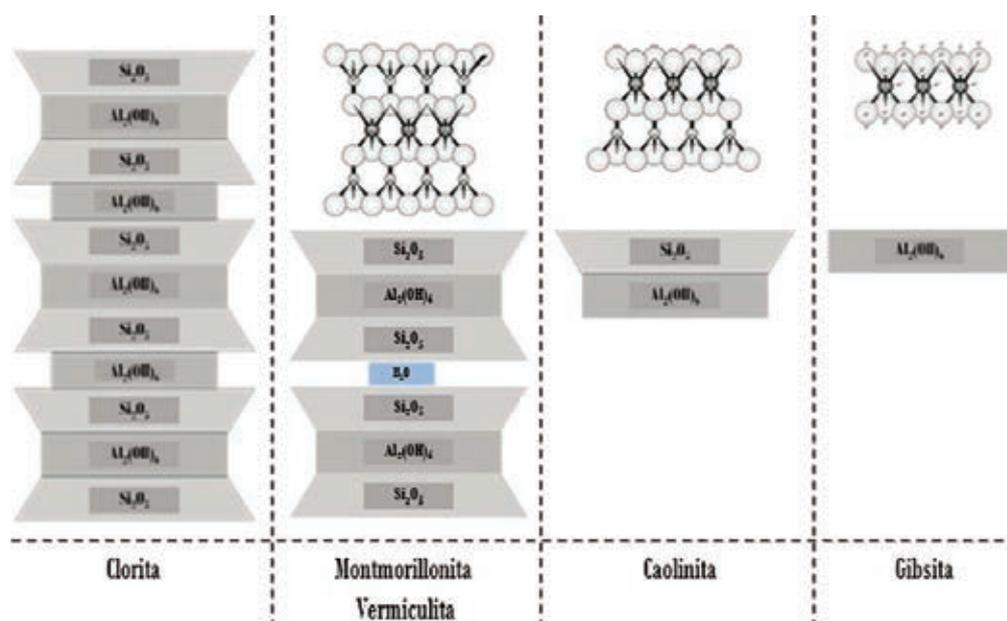


Figura 8.2. Tipos de arcillas cristalinas que demuestran el proceso de desilificación. Adaptado de Nanzyo and Kanno (2018)

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.

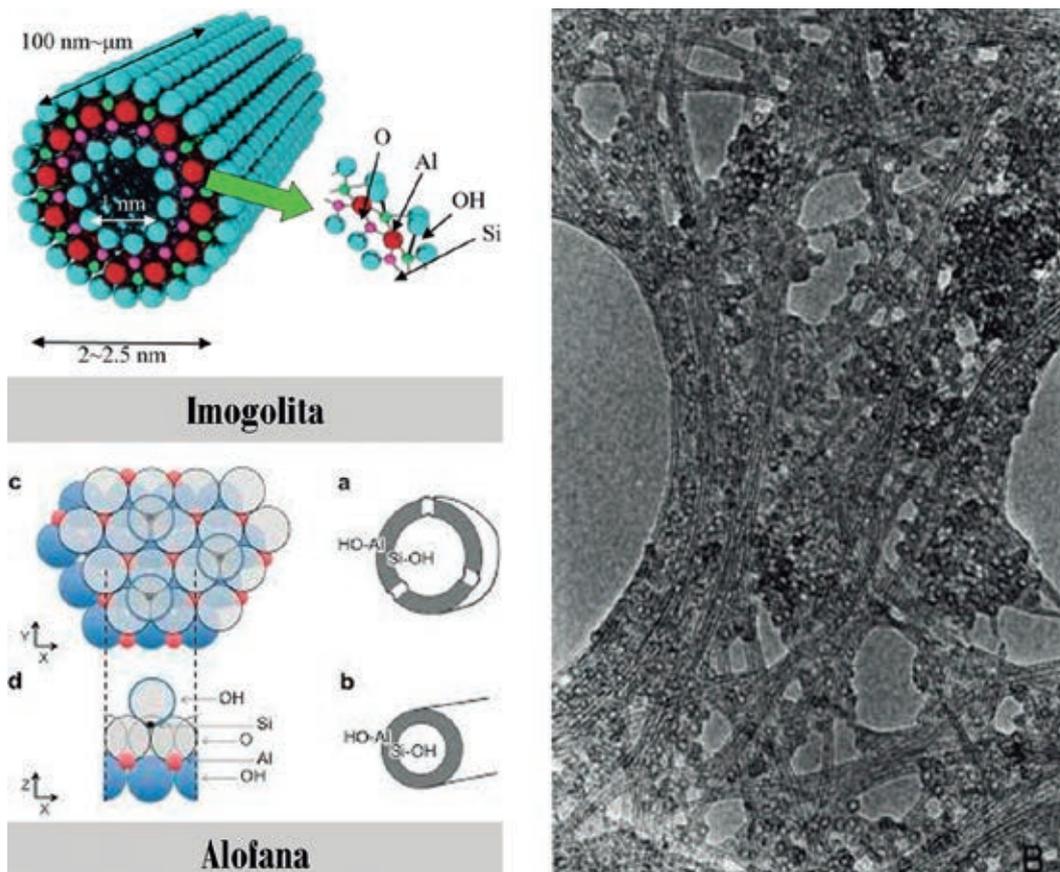


Figura 8.3. Estructuras de la alofana y la imogolita (izquierda) (Nanzyo and Kanno, 2018), Fotografía de la alofana (grumos) e imogolita (filamentos) vistas por microscopio electrónico (derecha) (Shoji, *et al.*, 1993).

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**.

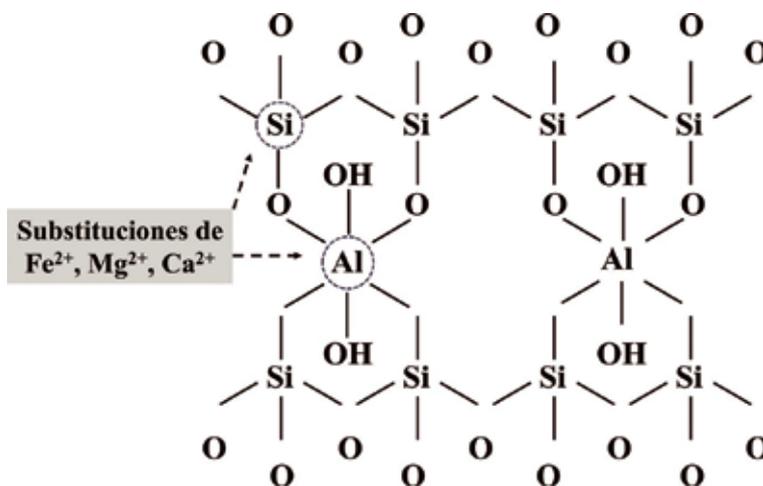


Figura 8.4. Sustitución isomórfica en la montmorillonita que produce carga eléctrica negativa permanente. Adaptado de Borchardt (1982) y Kodama (2012).

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.

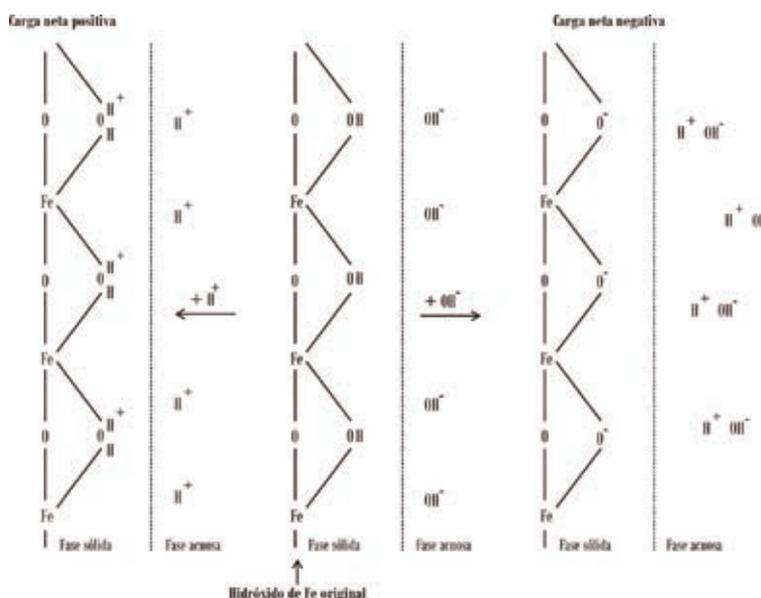


Figura 8.5. Origen de la carga en las arcillas de los suelos de carga variable (Uehara, 1978).

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.

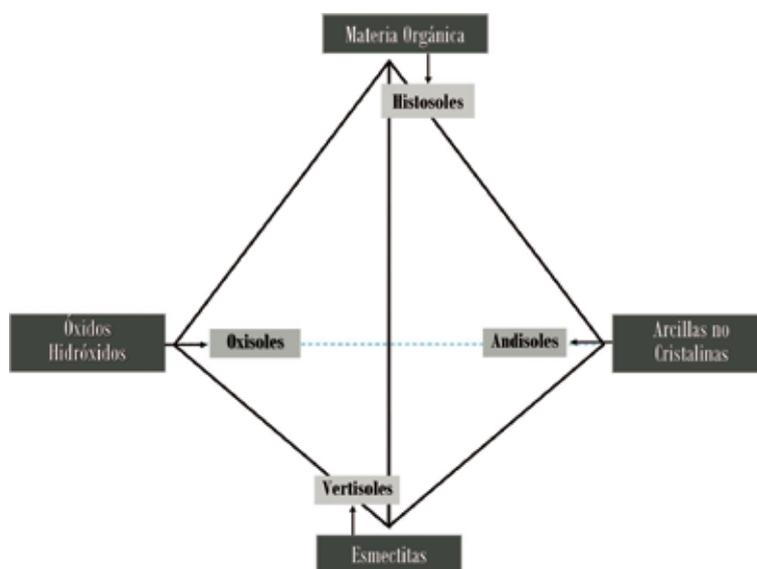


Figura 8.6. Relación entre los colides del suelo y la clasificación (Uehara and Gillman, 1981).

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.

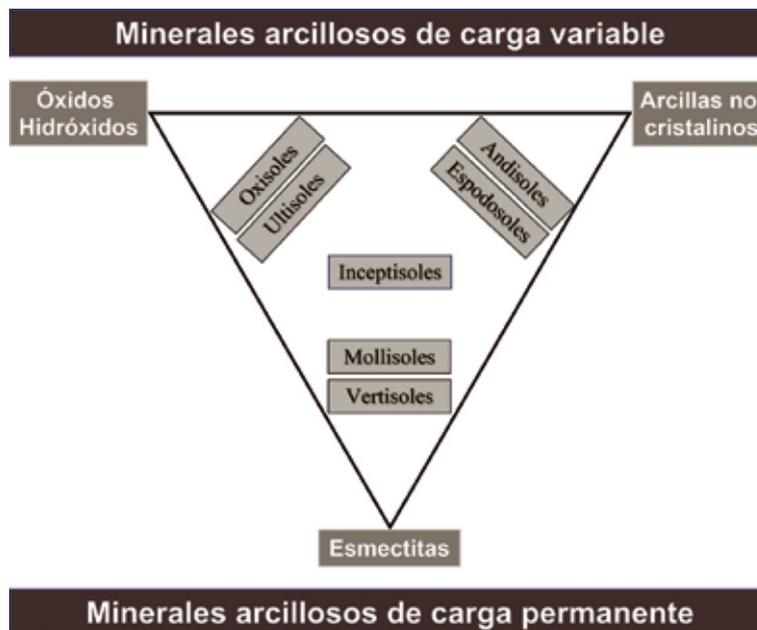


Figura 8.7. Relación entre los constituyentes inorgánicos y los órdenes de los suelos (Uehara and Gillman, 1981).

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.

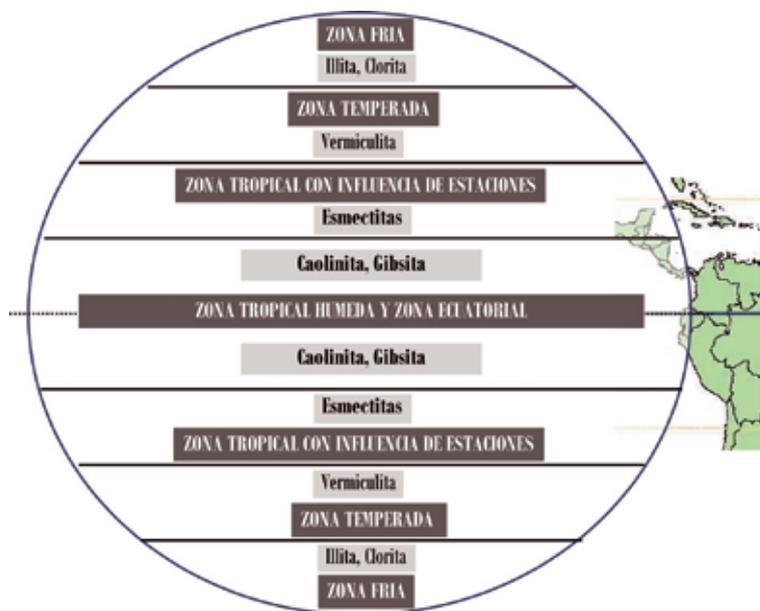


Figura 8.8. Distribución geográfica de los minerales arcillosos en el mundo de acuerdo con los efectos de la intemperización en las arcillas del suelo. Adaptado de Uehara and Gillman (1981).

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.

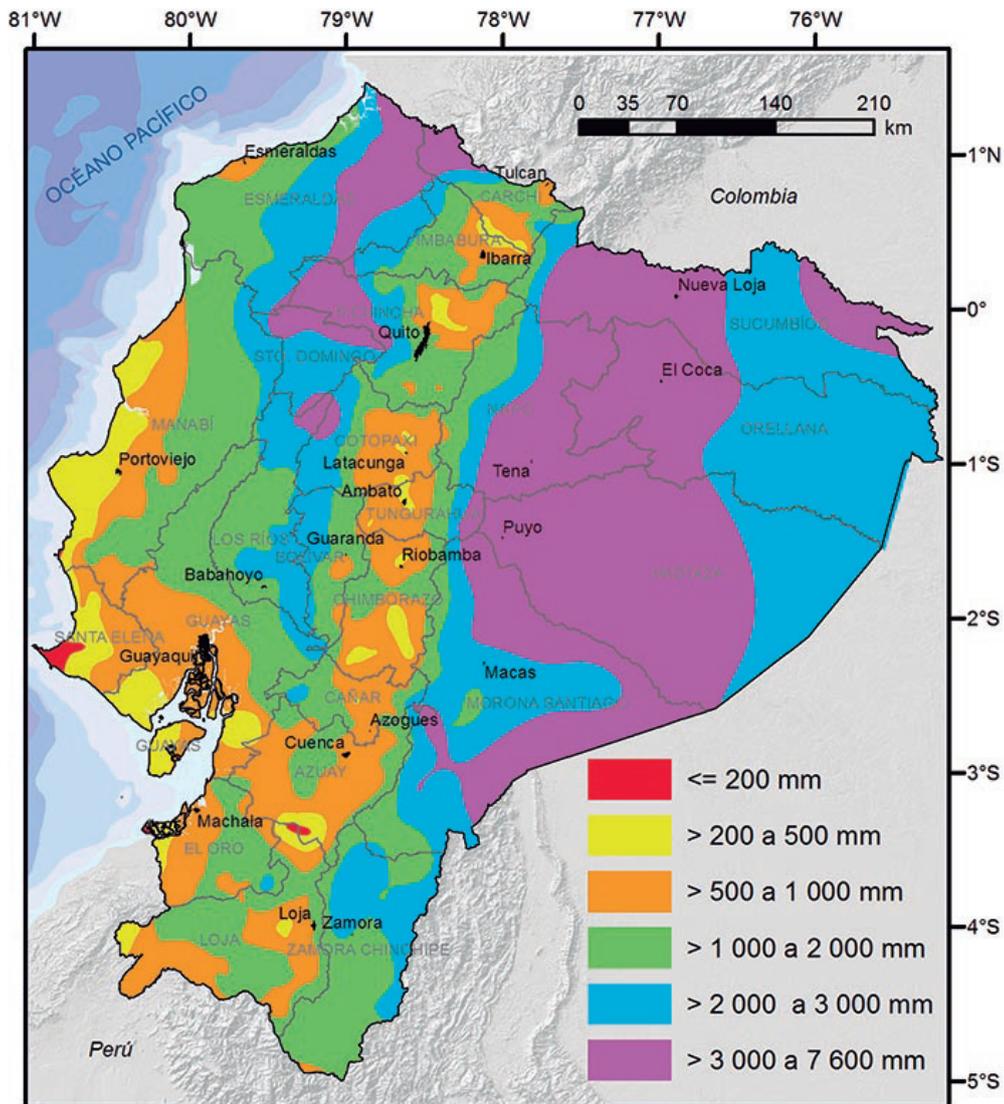


Figura 8.9. Pluviometría media anual en el Ecuador. Figura procesada a partir de la capa de Precipitación Anual 1: 50 000 del Geoportel del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2021).



Figura 8.10. Discontinuidad litológica generada por la acumulación de ceniza volcánica sobre roca primaria. Cangahua, Cayambe, Pichincha (izquierda) y Papallacta, Quito, Pichincha (derecha).

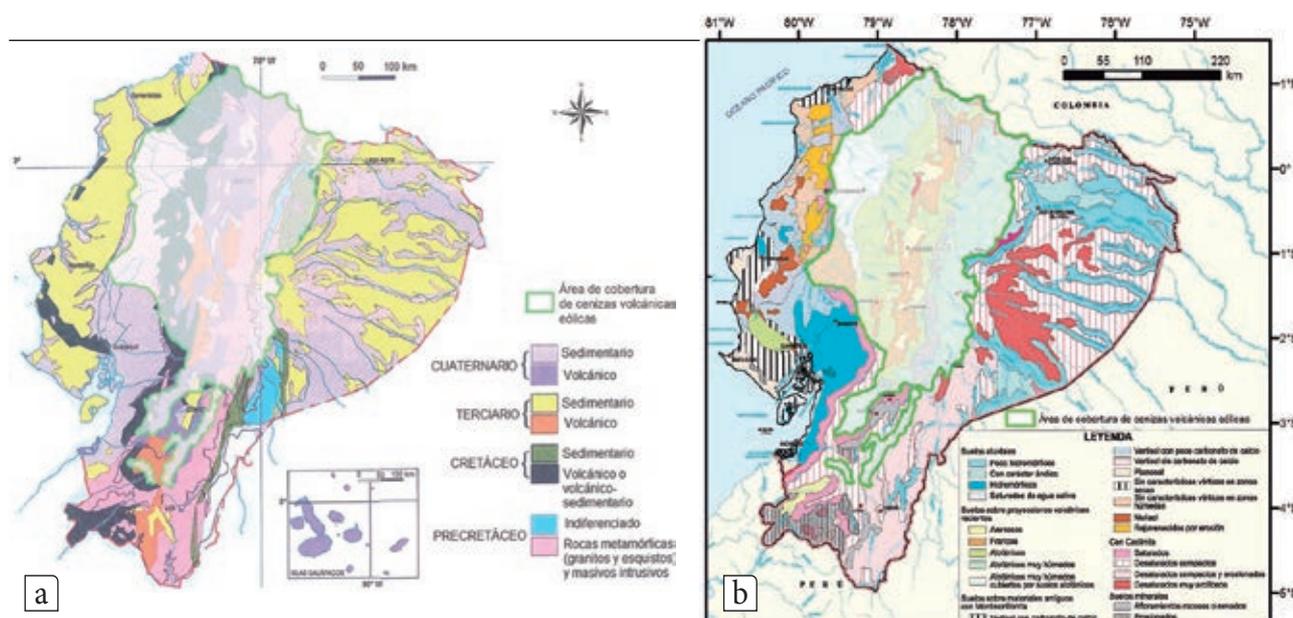


Figura 8.11. a) Distribución de las cenizas volcánicas eólicas (Winckell, 1982) sobre el mapa geológico del Ecuador (León, 2010) y b) sobre el mapa del Ecuador que agrupa suelos aluviales, montmorilloníticos, caoliniticos y alofánicos (IGM, 2013).

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).

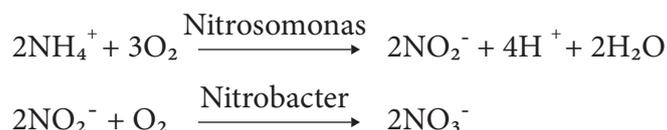
Por otro lado, el movimiento de cationes a capas inferiores (lixiviación) contribuye también a la acidificación del suelo. Este movimiento de cationes se debe a la presencia de aniones que formando pares iónicos se encargan de arrastrar los cationes del perfil del suelo con el movimiento del agua. En 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:



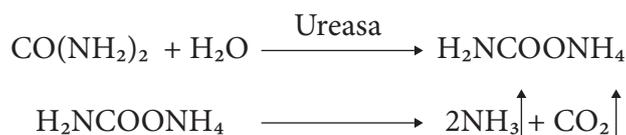
Esta reacción aporta H^+ , que reduce el pH, y bicarbonato (HCO_3^-) que se combina fácilmente con los cationes básicos lavándolos del perfil, promoviendo de esta forma condiciones favorables para acidez. La materia orgánica del suelo contiene también grupos funcionales como los carboxílicos y fenólicos 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:



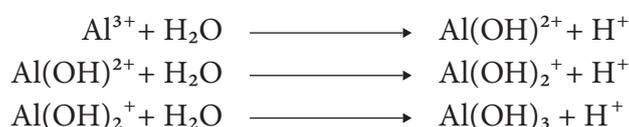
Como se observa la nitrificación produce un exceso de H^+ que acidifica el suelo. Este es un proceso natural necesario para transformar el NH_4^+ en NO_3^- , debido a que las plantas utilizan principalmente NO_3^- en su nutrición. Por otra parte, estas reacciones requieren oxígeno (O_2), por lo tanto, 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.

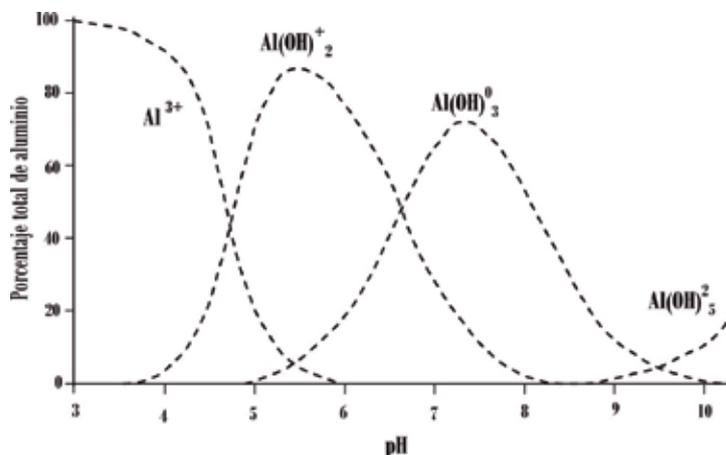


Figura 8.12. Distribución porcentual de las formas de aluminio en una solución de acuerdo con el pH (Havlin, *et al.*, 2014).

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:

$$\text{Saturación de acidez (\%)} = \frac{\text{Acidez intercambiable (cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1})}{\text{CICE= Al + H + Ca + Mg + K (cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1})} \times 100$$

$$\text{Saturación de aluminio (\%)} = \frac{\text{Aluminio intercambiable (cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1})}{\text{CICE= Al + H + Ca + Mg + K (cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1})} \times 100$$

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} .

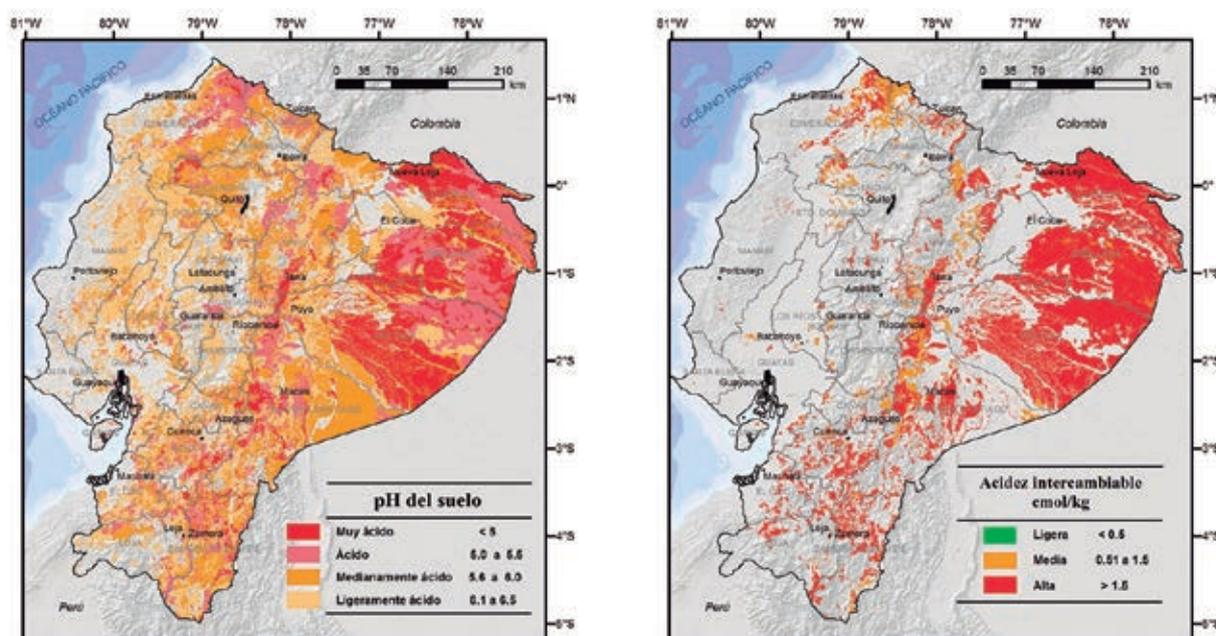


Figura 8.13. Distribución de los suelos ácidos en Ecuador: **a)** por pH del suelo y **b)** por acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$). Figuras procesadas a partir de la capa de Geopedología del Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2021).

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

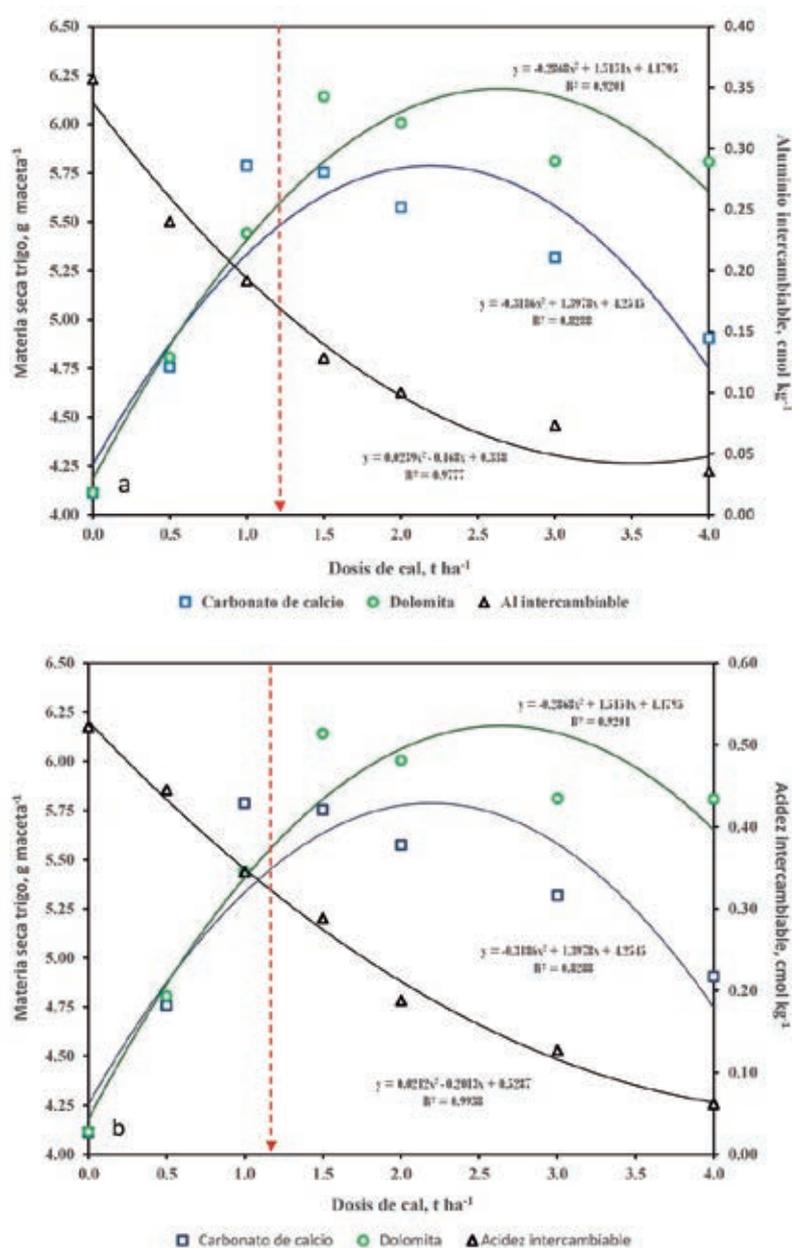


Figura 8.16. Efecto de aplicación de carbonato de calcio y dolomita en la producción de materia seca de trigo y en el contenido de acidez y aluminio intercambiables. Adaptado de Calva y Espinosa (2017).

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
Al	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).

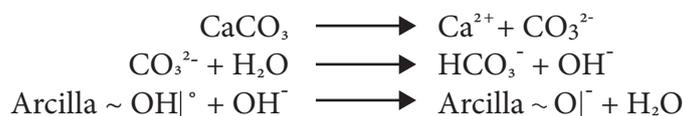
Dosis t ha ⁻¹	pH	Al + H -----	Al cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	CIC -----	Altura cm	Número de hojas
0	5.0	3	1.9	6.8	41.7	44
5.0	5.4	0	0	13.0	45.6	68
6.3	5.5	0	0	12.1	47.5	64

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		
				Al libre	Al-MO	
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**).

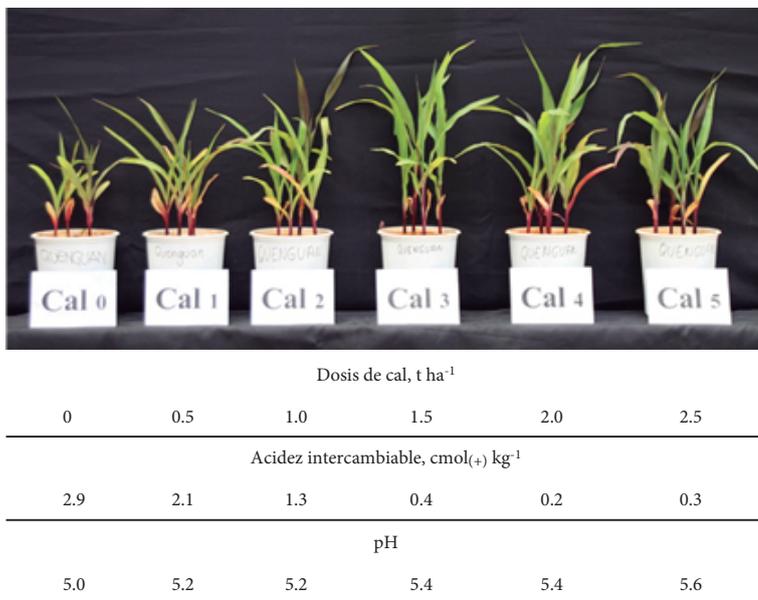


Figura 8.21. Experimento simple para determinar las necesidades de cal en suelos derivados de ceniza volcánica.

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.

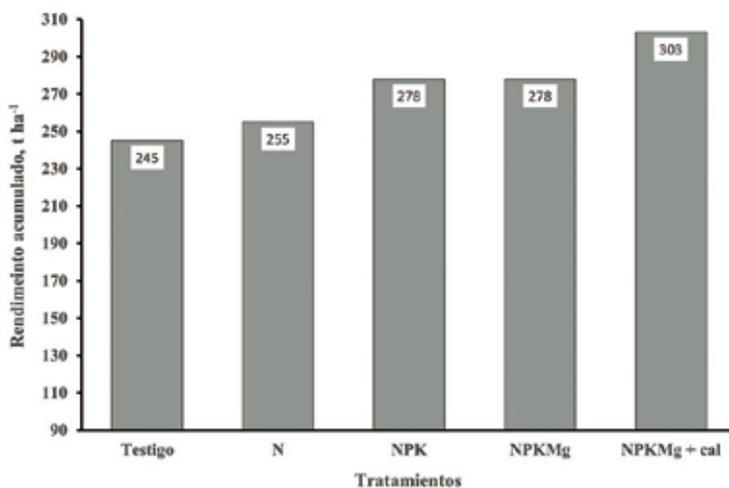


Figura 8.23. Rendimiento acumulado de racimos de palma luego de 12 años de evaluación. El Empalme, Mocache, Los Ríos (Mite, *et al.*, 1999, 2004).

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.

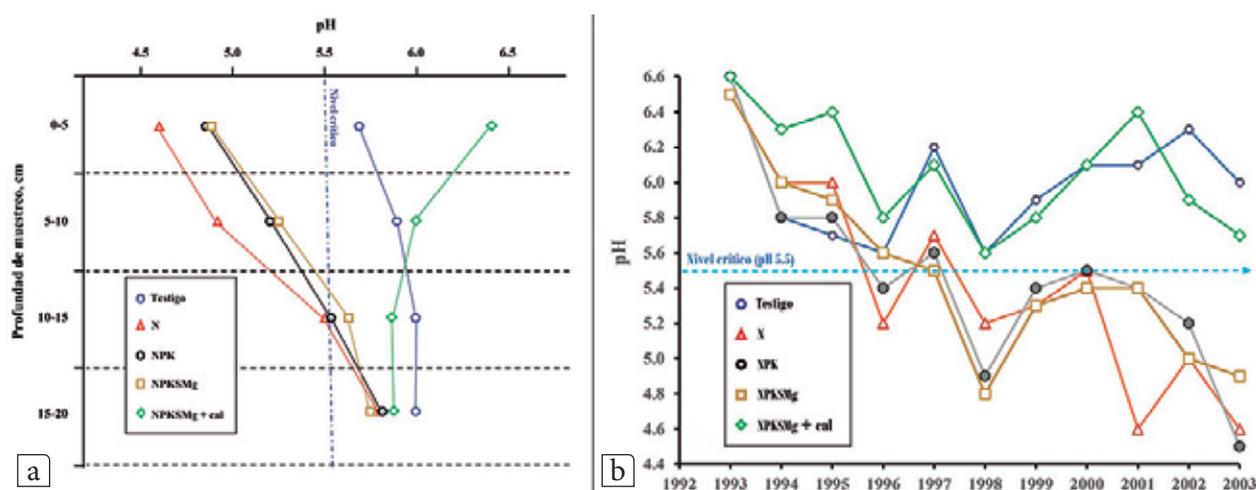


Figura 8.24. Efecto de 12 años de evaluación del comportamiento del pH del suelo bajo diferentes tratamientos de fertilización en El Empalme, Mocache, Los Ríos. a) Variación del pH en diferentes profundidades; b) Cambio del pH a través del tiempo (Mite, *et al.*, 2004).

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.

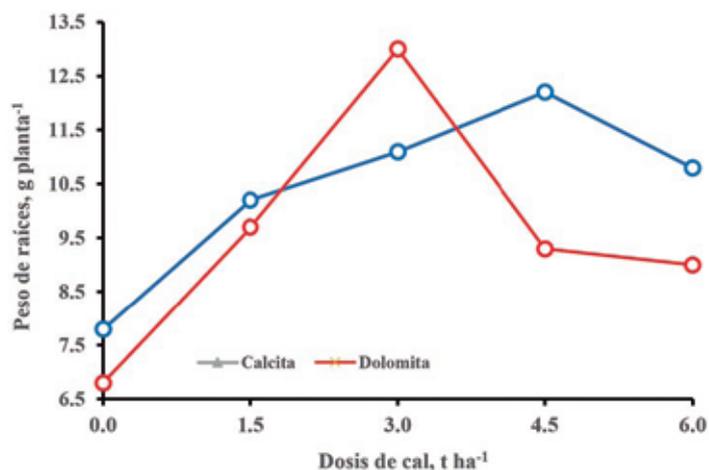
Los suelos de la zona de expansión de la piña en Ecuador reciben abundantes precipitaciones (> 3 000 mm al año) que promueven altas tasas de lixiviación. Esta condición está relacionada principalmente con la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) generada por la acidez en suelos de carga variable. 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.



Aluminio intercambiable (Al ³⁺), cmol _(c) kg ⁻¹					
○	0.8	0.3	0.1	0.1	0.0
○	0.8	0.3	0.0	0.1	0.1

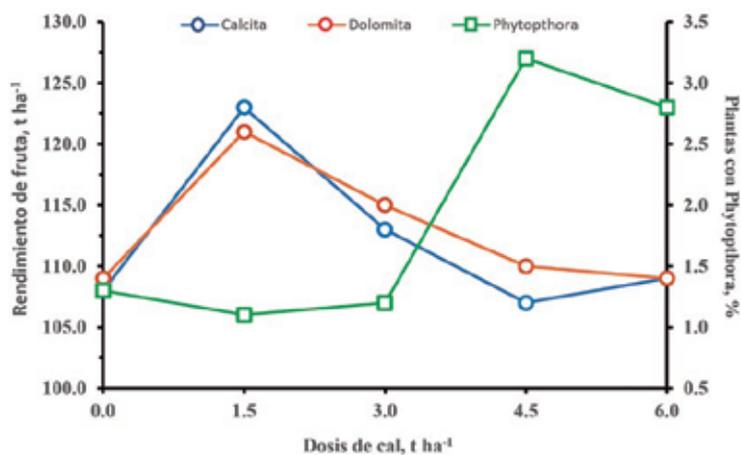
Figura 8.26. Efecto de la aplicación de calcita y dolomita en el crecimiento radicular de la piña y el contenido de Al³⁺ en el suelo. Valle Hermoso, Santo Domingo, Santo Domingo de los Tsáchilas.



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.

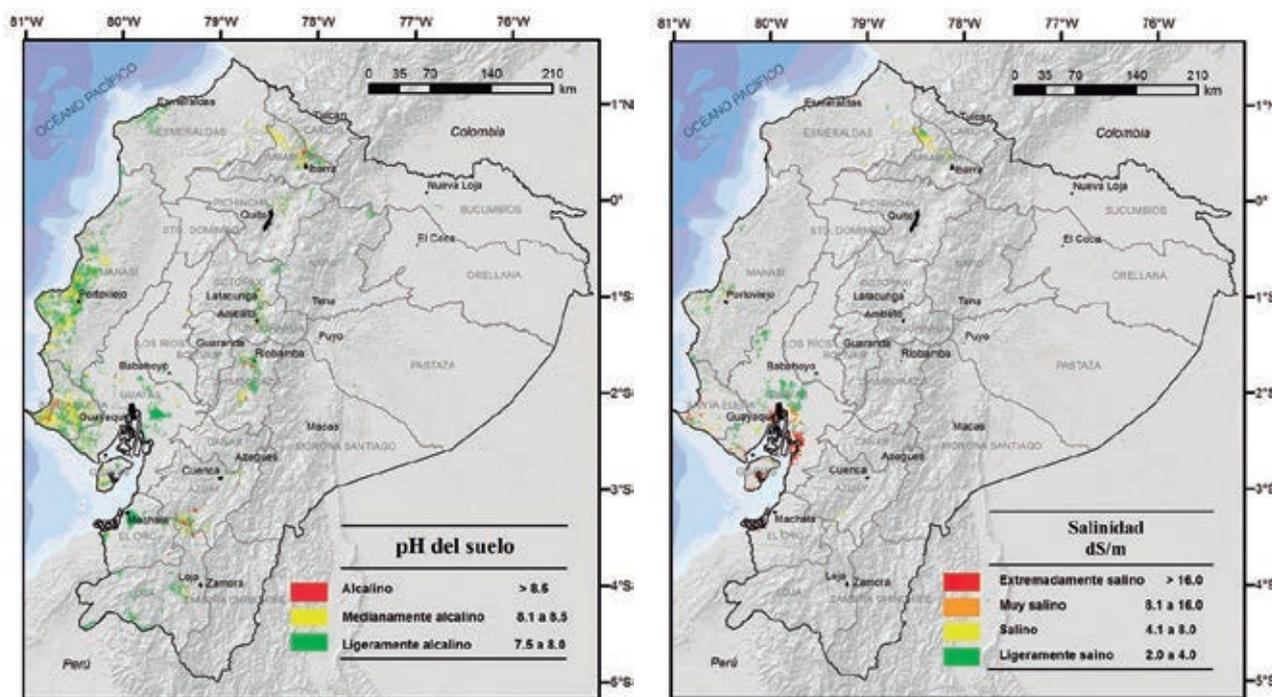


Figura 8.30. Distribución de la alcalinidad (izquierda) y la salinidad (derecha) de los suelos de Ecuador continental. Figuras procesadas a partir de la capa de Geopedología del Geoportel del IGM (IGM, 2021).

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.

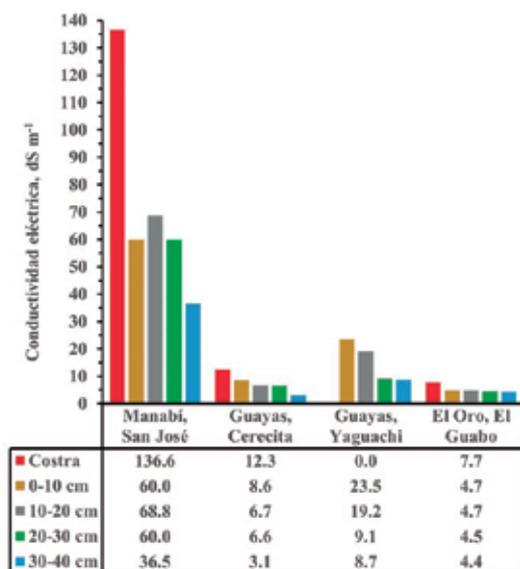


Figura 8.31. Variación de la conductividad eléctrica con respecto a la profundidad del suelo en las provincias de Manabí, Guayas y El Oro (Barriga y Mite, 2004).

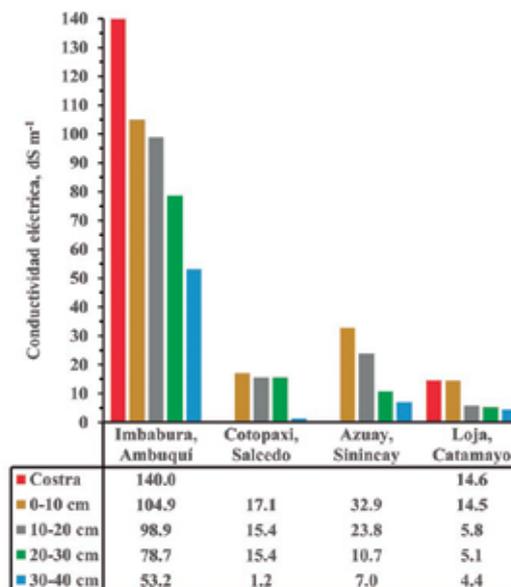


Figura 8.32. Variación de la conductividad eléctrica con respecto a la profundidad del suelo en las provincias de Imbabura, Cotopaxi, Azuay y Loja (Barriga y Mite, 2004).

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).

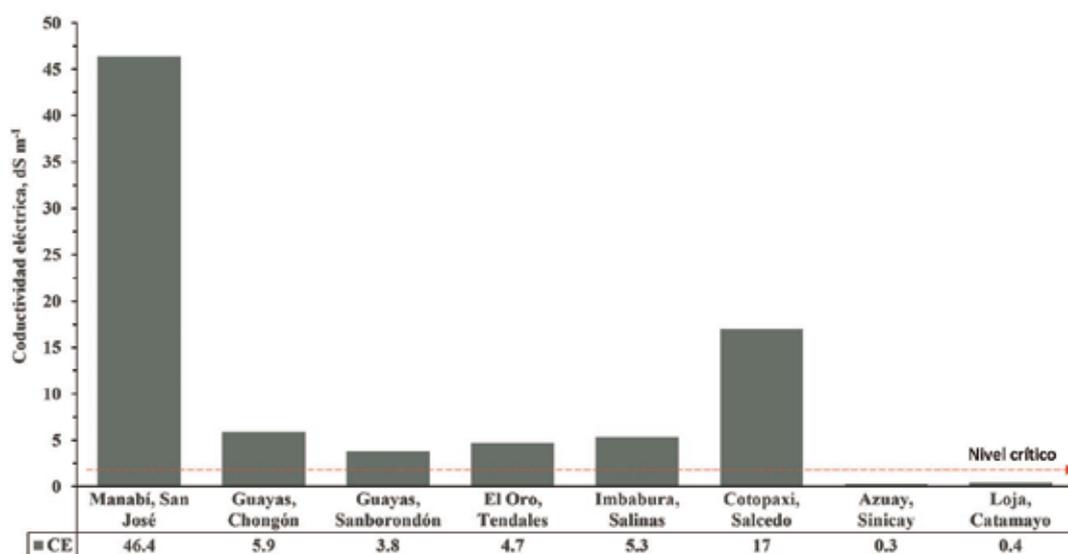


Figura 8.33. Variación de los valores más altos de conductividad eléctrica de las aguas de riego en diferentes localidades del país (Barriga y Mite, 2004).

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**.

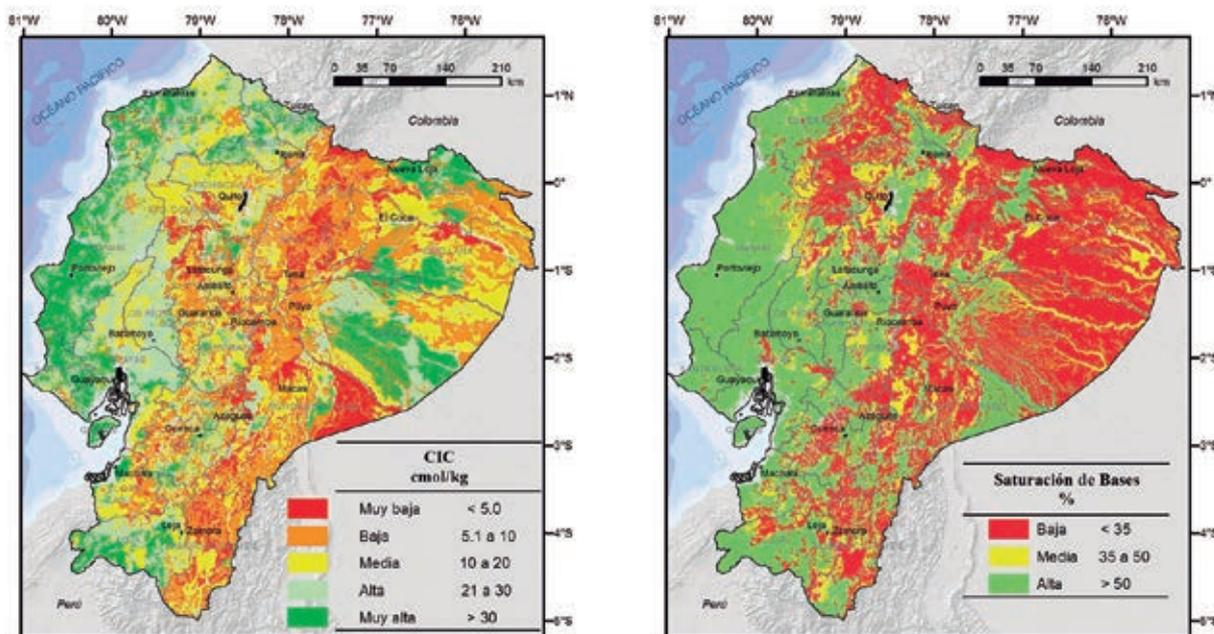


Figura 8.34. Distribución de la CIC determinada con acetato de amonio (izquierda) y de saturación de bases (derecha) en los suelos de Ecuador continental. Procesado a partir de la capa de Geopedología del Geoportal del IGM (IGM, 2021).

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).

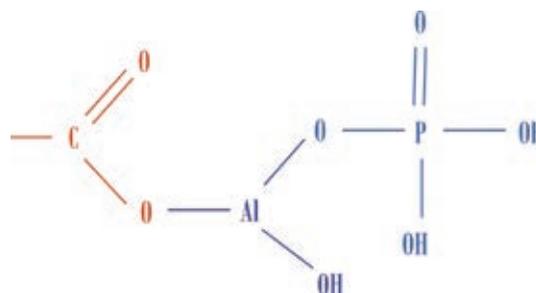


Figura 8.35. Representación esquemática de la fijación de fósforo en los complejos humus-Al (Sollins, 1991).

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).

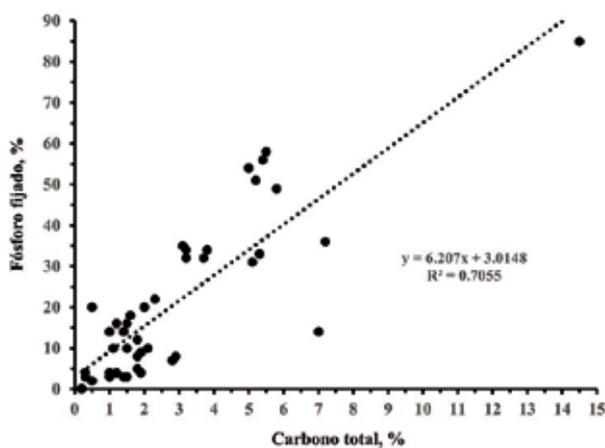


Figura 8.36. Correlación entre el contenido de carbono total y el porcentaje de fijación de fósforo en Andisoles de Ecuador (Espinosa, *et al.*, 1987).

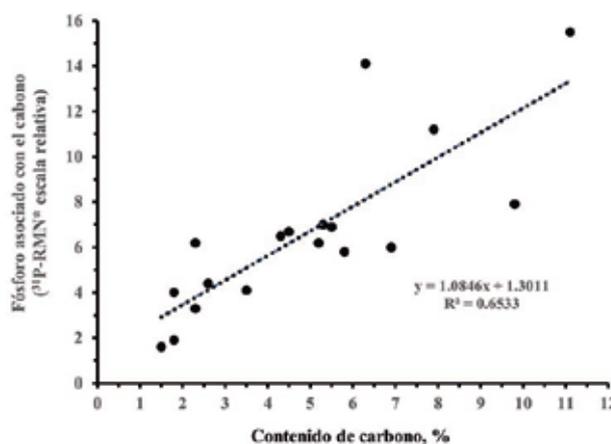


Figura 8.37. Correlación entre el contenido de carbono total y el porcentaje de fijación de fósforo en Andisoles de Chile (Briceño, *et al.*, 2004).

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.

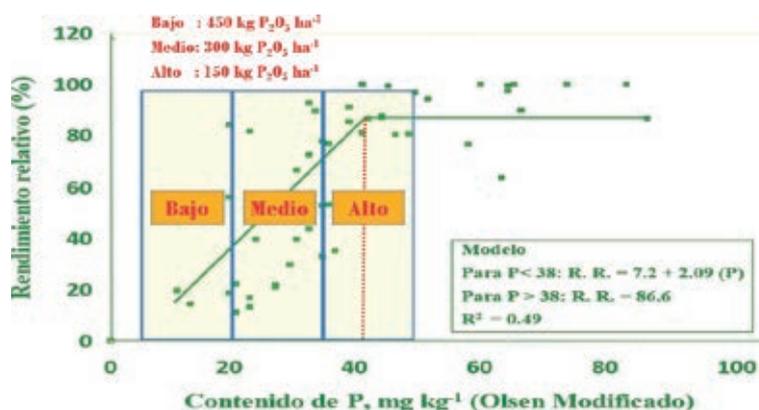


Figura 8.40. Calibración del análisis de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica de la Sierra Norte de Ecuador utilizando el método de modelos discontinuos (Córdova, *et al.*, 1996).

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.

SUELOS DEL ECUADOR CLASIFICACIÓN, USO Y MANEJO



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

Síguenos en:



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

