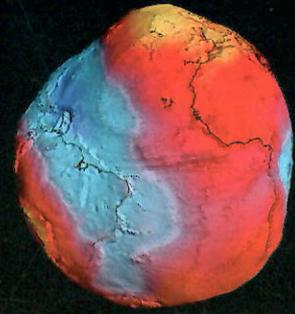


REVISTA GEO & CIENCIAS DATOS

INSTITUTO · GEOGRÁFICO · MILITAR



8va. EDICIÓN | abril-2017

CONFERENCE · CONGRESS PROCEEDINGS

NOV-2016

SIRGAS ECUADOR



SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS - SIRGAS



SIRGAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Trimble
INSTRUMENTAL & ÓPTICA



- CARTOGRAFÍA
- GEOGRAFÍA
- GEODESIA
- GEOMÁTICA: Teledetección · SIG · GNSS · IDE



Instituto
Geográfico
Militar

- Crnl. de E.M.C. William R. Aragón C.
Director del I.G.M.
- Crnl. de E.M. Ricardo O. Urbina C.
Subdirector del I.G.M.
- **Comité Editorial:**
Tcrn. IGEO. Rafael Delgado H. • (Ecuador)
Dr. Ing. Hermann Drewwes • (Alemania)
Mgr. William Martínez • (Colombia)
Dr. Virginia Marckern • (Argentina)
Dr. Silvio de Freitas • (Brasil)
Dra. Laura Sánchez • (Colombia)
Dr. Victor Cioce • (Venezuela)
Lic. Adela Camacho • (Ecuador)
Tlga. Jacqueline Páez • (Ecuador)
- **Arte y Diagramación:**
Dis. David Díaz S.
- **Corrección de Estilos:**
Ing. Catalina Erazo MSc.
Ing. Myrian Herrera MSc.
- **Editor:**
Tcrn. IGEO. Carlos M. Estrella P. • (Ecuador)
- **Co-Editor:**
Físico. Luis Porras MSc. • (Venezuela)

La Revista Geociencias & Geodatos es una publicación anual del Instituto Geográfico Militar del Ecuador dirigida a la población científica y universitaria con la finalidad de difundir los trabajos de investigación, estados de arte y proceedings de Congresos, relacionados con las áreas de la Geociencia: Cartografía, Geodesia, Geografía y Geomática (Teledetección, Sistemas de Información Geográfica, GNSS).

La Revista Geociencias & Geodatos del 2016 es la primera edición con Registro ISSN.

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos, siempre y cuando se cite su procedencia.

Las opiniones y conceptos expresados por los autores son de su exclusiva responsabilidad. La revista no se solidariza con doctrinas, ideas o pensamientos expresados en ellos.

Solicitudes, comentarios y sugerencias favor dirigirse a:

revista.igm@mail.igm.gob.ec

Gestión de Investigación y Desarrollo. Instituto Geográfico Militar.

Dirección: Seniergues E4-676 y Gral. Telmo Paz y Miño, Sector El Dorado.

Casilla postal: 17-01-2435

Quito - Ecuador

www.igm.gob.ec; www.geoportaligm.gob.ec

Presentación

El INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR del Ecuador alineado a las políticas de SEGURIDAD, DEFENSA, DESARROLLO NACIONAL y APOYO A LA GESTIÓN DE RIESGOS, sustenta sus pilares fundamentales en los ámbitos de la GEOINFORMACIÓN, SERVICIOS ESPECIALIZADOS e INVESTIGACIÓN en las áreas de: CARTOGRAFÍA, GEODESIA, GEOGRAFÍA y GEOMÁTICA (Teledetección, IDEs, SIG y GNSS), mismas han trazado una historia técnica en su ámbito de competencia, que ha marcado al país durante 89 años.

En Noviembre de 2016 por primera oportunidad, luego de 22 años, el Ecuador fue sede a través del Instituto Geográfico Militar del Simposio y Taller Internacional del "Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas – SIRGAS" la cual contó con la presencia de profesionales de 15 de los países miembros. Se presentaron en total 62 ponencias científicas sobre los avances alcanzados durante el último año en las actividades relacionadas con las geociencias, así como se evaluaron los proyectos en desarrollo y se delinearon los nuevos planes de trabajo que permitirán la participación activa de la comunidad SIRGAS en temas geodésicos de actualidad global.

El Taller estuvo centrado en consolidar estrategias orientadas hacia la unificación de las Redes Verticales de los países miembros de SIRGAS y fueron analizadas las particularidades de las redes altimétricas nacionales de forma que cada país miembro pudiera tener un mayor protagonismo en la realización de las tareas asociadas.

Por lo que antecede, los contenidos de la presente edición, son el resultado de las investigaciones presentadas por científicos, académicos, empresas y estudiantes, durante el Simposio y Taller SIRGAS 2016 ECUADOR y, que participan activamente en temas relacionados en geociencias y en el mejoramiento de estrategias de procesamiento para una unificación y mejora en precisión-exactitud del marco de referencia terrestre internacional.

El INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR se destaca en el ámbito de las geociencias, gracias al perseverante trabajo que viene desplegando, constituyendo así un soporte en el proceso de toma de decisiones y en la construcción efectiva de la Sociedad del Buen Vivir, tanto en el campo nacional, regional como internacional.



"Unidos por la ciencia y el espíritu para el progreso del Ecuador"

Coronel de E.M.C
ING. WILLIAM ROBERTO ARAGÓN CEVALLOS
DIRECTOR DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

Presentación

Uno de los propósitos de la revista Geociencias&Geodatos del Instituto Geográfico Militar de Ecuador es la publicación y divulgación orientada a la comunidad científica y universitaria, de temas relacionados con el área de Geociencias: Cartografía, Geodesia, Geografía y Geomática: Teledetección, IDEs, SIG, GNSS.

En Noviembre de 2016 el Instituto Geográfico Militar fue sede del Simposio y Taller Internacional del "Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas – SIRGAS" en donde se contó con la presencia de sus autoridades y/o delegados, de la International Association of Geodesy (IAG), del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), representantes nacionales, Comité Ejecutivo, Consejo Científico, representantes de los tres grupos de trabajo (I: Sistema de Referencia, II: Ámbito Nacional, III: Datum Vertical) y de todo el personal participante que hizo posible la materialización del evento.

En el Simposio se presentaron ponencias relacionadas al:

- Mantenimiento del Marco de Referencia Continental,
- Detección y evaluación de efectos geodinámicos sobre el Marco de Referencia,
- Contribuciones de los centros de análisis SIRGAS,
- Estudios de la atmósfera neutra basados en la infraestructura sirgas,
- Sistemas de alturas, gravimetría y geoides y
- Perspectivas de actividades de SIRGAS en vista al IHRS/IHRF.

Esta edición, Congress Proceeding del "Simposio y Taller SIRGAS 2016 ECUADOR", busca resaltar las investigaciones y trabajos seleccionados presentados en el evento, y al mismo tiempo ser una ventana para el desarrollo de todo tipo de actividades prácticas y científicas relacionadas con la determinación precisa de coordenadas, navegación, investigación en geociencias y aplicaciones multidisciplinarias.

Aprovechamos la oportunidad para hacer extensible la más sincera felicitación y agradecimiento a todas las autoridades, participantes y personal del Instituto Geográfico Militar en todos sus ámbitos, quienes con su presencia, apoyo incondicional y trabajo desinteresado, hicieron posible la excelente realización del evento científico antes indicado.

Se invita a toda la comunidad científica a que nos remitan sus trabajos, reportes y revisiones relacionadas a las temáticas planteadas en la Revista Geociencias&Geodatos y así poder llevar a cabo una transferencia y vinculación con el fin de fortalecer una conciencia crítica fundamental para la generación de nuevo conocimiento.

Comité Editorial



COMITÉ ORGANIZADOR SIRGAS 2016 ECUADOR:

CRNL. EMC. Ing. William R. Aragón C.
(Director del Instituto Geográfico Militar)

CRNL. EM. Ing. Ricardo O. Urbina C.
(Subdirector del Instituto Geográfico Militar)

TCRN. IGEO. Ing. Rafael Delgado H., Mgtr.
(Jefe de la Gestión Geoinformación)

TCRN. IGEO. Ing. Carlos M. Estrella P., M.Sc.
(Jefe de la Gestión de Investigación y Desarrollo – Representante Nacional ante SIRGAS por Ecuador)

LIC. Luis Proaño T., Mgtr.
(Jefe de la Gestión de Comunicación Social)

FIS. Luis I. Porras R., M.Sc.
(Investigador. Gestión de Investigación y Desarrollo)

LIC. Adela F. Camacho P.
(Vinculación y Transferencia. Gestión de Investigación y Desarrollo)

TLGA. Jacqueline Páez C.
(Vinculación y Transferencia. Gestión de Investigación y Desarrollo)

PERSONAL DE APOYO:

Diseño Gráfico de la Gestión de Geoinformación.
Investigadores (I+D+i) y apoyo (Vinculación y Transferencia) de la Gestión de Investigación y Desarrollo.

Personal de las gestiones de Geoinformación, Seguridad Documentaria, Talento Humano, Tecnología, Servicios Institucionales y Transportes, Seguridad Integral, Centro Cultural-Planetario, Comunicación Social, Financiero, Jurídico y Centro Médico.
Sres. Oficiales, Voluntarios y Conscriptos.

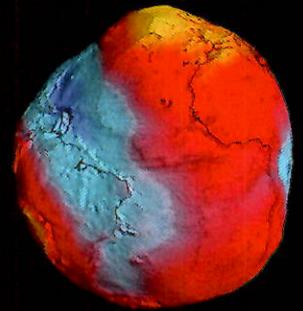
Contenido

REPORTE ANUAL DEL CENTRO DE PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS - IGM ECUADOR PERIODO 2015 – 2016 GPS WEEK DE 1865 HASTA 1913	<i>Morillo, A; Cisneros, D; Rea, W; Chávez, A & España, O</i>	1
METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CUASIGEOIDE PARA EL ECUADOR CONTINENTAL APLICANDO LA TEORÍA DE MOLODENSKY	<i>Barahona, C & Tierra, A</i>	5
SISTEMA DE ALTURAS PARA EL ECUADOR	<i>Cañizares, E; Tierra, A; Leiva, C; Staller, A & Pallero, J. L. G.</i>	15
ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS CORTICALES DE ESTRUCTURAS A PARTIR DE ONDULACIONES ISOSTÁTICAS Y MODELOS GEOPOTENCIALES	<i>Infante, C; Tocho, C; Del Cogliano, D & Galván, L</i>	25
OBTENCIÓN DE COORDENADAS PRECISAS DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO PARA DETECCIÓN DE MOVIMIENTOS RÁPIDOS	<i>Negrete, D; López, D & Robayo, A</i>	31
GRAVIMETRÍA EN EL ECUADOR	<i>Flores, F & Pozo, M</i>	40
MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA LA TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS ENTRE LOS SISTEMAS DE REFERENCIA PSAD56 Y SIRGAS95, UTILIZANDO TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS	<i>Guajala, H; Zambrano, M & Leiva, C</i>	49
GeoScope-Velocity: CALCULADORA GEODÉSICA PARA DISPOSITIVOS MÓVILES EN ANDROID STUDIO	<i>Ayala, L; Tierra, A; Luna, M; Staller, A; Benito, M.B & Gaspar, M</i>	57
CÁLCULO DE COORDENADAS USANDO EL MÉTODO PRECISE POINT POSITIONING -PPP ESTÁTICO MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE RTKLIB	<i>Albán, M; Romero, R & Tierra, A</i>	63
APORTE A ESTUDIOS SISMOLÓGICOS, MEDIANTE ESTACIONES SIRGAS-RT	<i>Camisay, M. F; Mateo, M.L; Mackern, M.V & Robin, A.M</i>	70
ANÁLISIS DE EXTRACTOS DE MODELOS GLOBALES DEL GEOPOTENCIAL GENERADOS PUNTO A PUNTO A PARTIR DE UNA APLICACIÓN STANDALONE	<i>Nicacio Junior, E.L & Dalazoana, R</i>	76
VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL RASTREO ÓPTIMO GNSS USANDO SOFTWARE COMERCIAL	<i>Portilla, O; Tierra, A & Godoy, L</i>	84
DIFERENCIAS OBTENIDAS DEL CONTENIDO DE VAPOR DE AGUA EN CIERTAS REGIONES DEL ECUADOR ENTRE PRODUCTOS SATELITALES Y VALORES CALCULADOS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA REGME	<i>Porras, L; Romero, R; Herrera, M; Amores, M; Estrella, C; Zavala, M & Tierra, A</i>	89

REVISTA

GEO & CIENCIAS DATOS

INSTITUTO · GEOGRÁFICO · MILITAR



REPORTE ANUAL DEL CENTRO DE PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS - IGM ECUADOR PERIODO 2015 – 2016 GPS WEEK DE 1865 HASTA 1913

Morillo, A; Cisneros, D; Rea, W; Chávez, A & España, O

Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador

Proceso de Geodesia (+593) 2 3975100 • Ext.: 2013

Email: alfonso.morillo@mail.igm.gob.ec; Email: david.cisneros@mail.igm.gob.ec;

Email: wladimir.rea@mail.igm.gob.ec; Email: alberto.chavez@mail.igm.gob.ec;

Email: oswaldo.espana@mail.igm.gob.ec

Resumen

El Instituto Geográfico Militar (IGM) consciente de los problemas presentados en el Ecuador por la incompatibilidad entre el uso masivo de los sistemas satelitales de navegación global (GNSS) como el sistema GPS y los datum horizontales clásicos como el PSAD56 (Provisional South American Datum of 1956), propuso la meta de proporcionar un Marco Geodésico acorde a las necesidades actuales y entró a formar parte del proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) para determinar su red nacional enlazada al sistema geodésico de referencia ITRF (International Terrestrial Reference System), mantenido por el IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) lo cual garantiza que continuará siempre actualizado de acuerdo a los requerimientos de Georreferenciación del nuevo milenio, con este propósito, el IGM con el apoyo de instituciones públicas y privadas del país, ha establecido a partir del año 2008, la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), que es un conjunto de estaciones GNSS (GPS+GLONASS) de monitoreo continuo, enlazadas a la Red Nacional GPS de Ecuador (RENAGE) y a la Red Continental SIRGAS-CON, la REGME, posee varias estaciones distribuidas a lo largo del territorio nacional, las cuales captan datos GNSS las 24 horas del día, los 365 días del año, proporcionando información necesaria para realizar el procesamiento diferencial de información GPS, sin necesidad de salir de campo para la colocación de bases GPS, que muchas veces generan problemas de logística y accesibilidad a los puntos; así como aumento de presupuesto, paralelamente, el IGM estableció el Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador (CEPGE) el cual inicio sus actividades como centro de procesamiento experimental de SIRGAS a partir del 01 de enero de 2009, el 01 de enero de 2010, el CEPGE es declarado centro oficial realizando el procesamiento con el software científico BERNESE v5.0.

Palabras Clave: IGM, CEPGE, GNSS, SIRGAS, BERNESE.

Abstract

The Military Geographic Institute (IGM) is aware of the problems presented in Ecuador by the incompatibility between the massive use of global navigation satellite systems (GNSS) such as the GPS system and classic horizontal datums such as PSAD56 (Provisional South American Datum of 1956), proposed the goal of providing a Geodetic Framework according to current needs and became part of the SIRGAS (Geocentric Reference System for the Americas) project to determine its national network linked to the ITRF (International Terrestrial Reference System), maintained by the IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), which guarantees that it will always be updated according to the requirements of Georeferencing of the new millennium, for this purpose, the IGM with the support of public and private institutions of the country, has established since 2008 the GNSS Network for Continuous Monitoring of Ecuador (REGME), which is a set of GNSS stations (GPS + GLONASS) for continuous monitoring, linked to the National GPS Network of Ecuador (RENAGE) and the Network Continental SIRGAS-CON, the REGME, has several stations distributed throughout the national territory, which collect GNSS data 24 hours a day, 365 days a year, providing necessary information to perform the differential processing of GPS information, without necessity to do field surveys for the placement of GPS bases, which often generate problems of logistics and accessibility to points, as well as increase of budget; in parallel, the IGM established the GNSS Data Processing Center of Ecuador (CEPGE), which began its activities as a SIRGAS experimental processing center from January 1, 2009, on January 01, 2010, The CEPGE is declared official center performing the processing with the scientific software BERNESE v5.0.

Keywords: IGM, CEPGE, GNSS, SIRGAS, BERNESE.

Introducción

Los centros locales de procesamiento de SIRGAS, están encargados de adelantar el cálculo semanal de un conjunto específico de estaciones de la red SIRGAS-CON, de modo que se garantice que cada estación este incluida en tres soluciones individuales. El presente documento describe las actividades realizadas por el CEPGE en el periodo 2015 -2016, evaluando la disponibilidad de la información, la consistencia de las soluciones libres comparadas con otros centros que procesan la misma red, los productos adicionales, inconvenientes, conclusiones y perspectivas futuras.

Metodología

La estrategia adoptada por el CEPGE, responde directamente a los estándares de procesamiento promulgados por el International GNSS Service - IGS, International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS y por supuesto SIRGAS:

1. Sistema operativo y características del hardware

Sistema Operativo Windows 7, 32 Bits
Estación de trabajo HP
Z800 Work Station

2. Se generan soluciones GPS + GLONASS o solo GPS.

Únicamente se generan soluciones GPS

3. Hubo cambios en la estrategia de procesamiento.

La estrategia de procesamiento actualmente utilizada está acorde a documento: *Instructivo para la instalación y configuración del Bernese GNSS Software V. 5.2, según los estándares de procesamiento utilizados en SIRGAS. L. Sanchez, 2013-06-28.*

A continuación se presenta un resumen de las variables (básicas) aplicadas, la estrategia y estándares del procesamiento (ver tabla 1):

Parámetros de control para la Solución Diaria obtenida del procesamiento semanal ejecutado por el CEPGE:

- $CHI^{*2} / DOF = \sim 1 \dots 3$
- $\#OBSERVATIONS \gg 10\ 000$
- Correcciones a las coordenadas iniciales < 5 cm
- Estación con problemas (muy pocas observaciones, residuales o correcciones muy grandes), se eliminan de la solución.

Parámetros de control para la Solución Combinada Semanal obtenida por el CEPGE:

- $CHI^{*2} / DOF < 1$
- Correcciones a las coordenadas iniciales < 5 cm
- Comparación de soluciones individuales:

- RMS < 10 mm para las componentes horizontales N y E

- RMS < 20 mm para la componente vertical

- Estación fuera del rango (en casos excesivos) para uno o todos los días de la semana, ésta se elimina del (los) día(s) en que presenta problemas a fin de limpiar la solución combinada final (ver fig. 1).

4. Listado de estaciones a cargo:

Estaciones a cargo del CEPGE, durante el periodo 2015 - 2016 (ver tabla2):

5. En caso de servir como Centro de Datos o tener relación con alguno, hubo solicitudes para la incorporación de estaciones a la red IGS o SIRGAS-CON?

El IGM es Centro de Datos GNSS de Ecuador. En el periodo 2015-2016 se realizó la solicitud de incorporación de la estación GNSS Portoviejo - PVEC DOMES NUMBER 42008M002. Esta estación reemplazo a la anterior PTEC, sin embargo por efectos del terremoto se destruyó PVEC y no se ha vuelto a instalar.

6. Se ha familiarizado con las recientes convenciones acerca del formato RINEX 3 y los cambios asociados con la denominación de las estaciones (nombre largo de las estaciones)

El CEPGE ECU, tiene conocimiento de la versión RINEX 3, sin embargo toda la información de la REGME se maneja bajo RINEX versión 2.11.

Nivel de precisión obtenido en las soluciones procesadas CEPGE - ECU

Para evaluar la calidad de los resultados del procesamiento, tomamos la repetibilidad obtenida del RMS para las tres componentes (N, E, U) como parámetro de análisis, puesto que proporciona una medida muy realista de la precisión obtenida como producto del procesamiento rutinario de la red; y es un indicador de la dispersión de las soluciones semanales.

El análisis de la repetibilidad comprende dos aspectos diferentes: análisis a corto plazo y análisis a largo plazo; la repetibilidad a corto plazo, permite verificar la precisión del cálculo (procesamiento) de una semana GPS en particular; la repetibilidad a largo plazo, permite verificar la precisión del cálculo de una semana GPS a corto plazo conjuntamente con varias semanas GPS a largo plazo, observando un nivel de acuerdo lineal el cual se desplaza en el tiempo, la repetibilidad a largo plazo está en el orden de los 2 mm en las componentes horizontales (N, E), mientras que la componente vertical (U) tiene un nivel de repetibilidad que oscila en torno a los 6 mm.

Este análisis implica, que el nivel de acuerdo de las soluciones semanales es homogéneo y garantiza la consistencia interna de la red procesada por el CEPGE (ver fig. 2).

Problemas presentados durante el periodo reportado (semanas 1865 a 1913)

- Flujo irregular de datos RINEX de las estaciones SIRGAS-CON, para el procesamiento:
- Guatemala
- Venezuela

Surinam
Cuba

- Desde el cambio de IP Pública de México, se interrumpió la normal conexión con el servidor FTP IGM Ecuador. De acuerdo a nuestro alcance local, hemos realizado todas las pruebas y configuraciones posibles, sin embargo México aún sigue con problemas de conectividad.

Tabla 1: Variables aplicadas en la estrategia de procesamiento del CEPGE - BERNESE v 5.2

PARÁMETRO	VARIABLE
Software de Procesamiento:	BERNESE versión 5.2
Release:	2015-03-09
Formato de los datos GPS:	RINEX v. 2.11
Constelación:	GPS
Intervalo de registro:	30 segundos
Máscara de elevación:	3 grados
Observaciones:	Dobles diferencias de fase
Órbitas	IGS finales (*.sp3), IGB08
Parámetros de orientación terrestre:	ERP semanales IGS
Modelo troposférico:	Vienna Mapping Function (VMF)
Modelo de carga y marea oceánica:	FES2004
Estrategia de líneas bases:	MAX-OBS
Variación de los centros de fase:	Calibración Absoluta, PHAS_IGS.08
Modelo Global de Gravedad:	EGM2008 (recomendado en caso de requerirlo)
Ponderación de las observaciones:	En función de la elevación, a menor elevación, menor Peso
Correcciones a los relojes de los satélites:	IGS
Calibración para la componente Z de los satélites	IGS
Ambigüedades de fase de la solución final:	Obtenidas de un número entero
Modelo de Nutación:	IAU2000R06
Modelo del Movimiento del Polo:	IERS2010XY
Modelos Ionosféricos:	CODE (CODwww.ION)
Quality Check RINEX:	TEQC
Tabla de abreviaciones de los nombres de las estaciones:	ECU.ABB
Tabla de coordenadas iniciales de las estaciones:	ECU11.CRD
Tabla de velocidades iniciales de las estaciones:	ECU11.VEL
Tabla con efectos por carga oceánica inducido en las estaciones:	ECU.BLQ
Efectos por carga atmosférica de origen mareal:	AMSUR.ATL
Información, combinación receptor + antena estaciones SIRGAS_CON	AMSUR52.STA

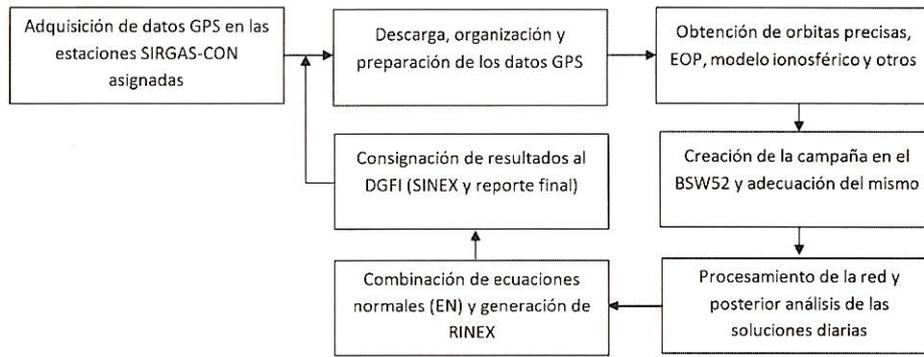


Figura 1. Flujograma del procesamiento científico semanal CEPGE - SIRGAS_CON.

Conclusiones

- El presente informe de actividades fue realizado entre la semana GPS 1865 a la 1913, de acuerdo a lo solicitado por el grupo de trabajo 1 de SIRGAS.
- Respecto a las actividades del Repro_SIRGAS, es un tema que debe tener un análisis detallado puesto que implica la inversión de recurso humano, software, hardware y por supuesto tiempo. Consideramos que no estuvo clara la decisión de iniciar esta actividad puesto que todas las variables requeridas para el procesamiento científico aún no estaban publicadas ni socializadas, por tal razón no se logró mantener esta actividad.
- Respecto al procesamiento se tomó en cuenta el procesamiento desde la semana 1865 hasta la semana

Tabla 2: Estaciones a cargo del CEPGE

País	N° Estaciones
Brasil	42
Colombia	25
Costa Rica	8
Cuba	1
Ecuador	40
Guyana	
Francesa	1
Guatemala	4
Nicaragua	2
Panamá	2
Perú	10
Surinam	1
Venezuela	1
Total	137

1913 las cuales se tiene datos procesados en el CEPGE.

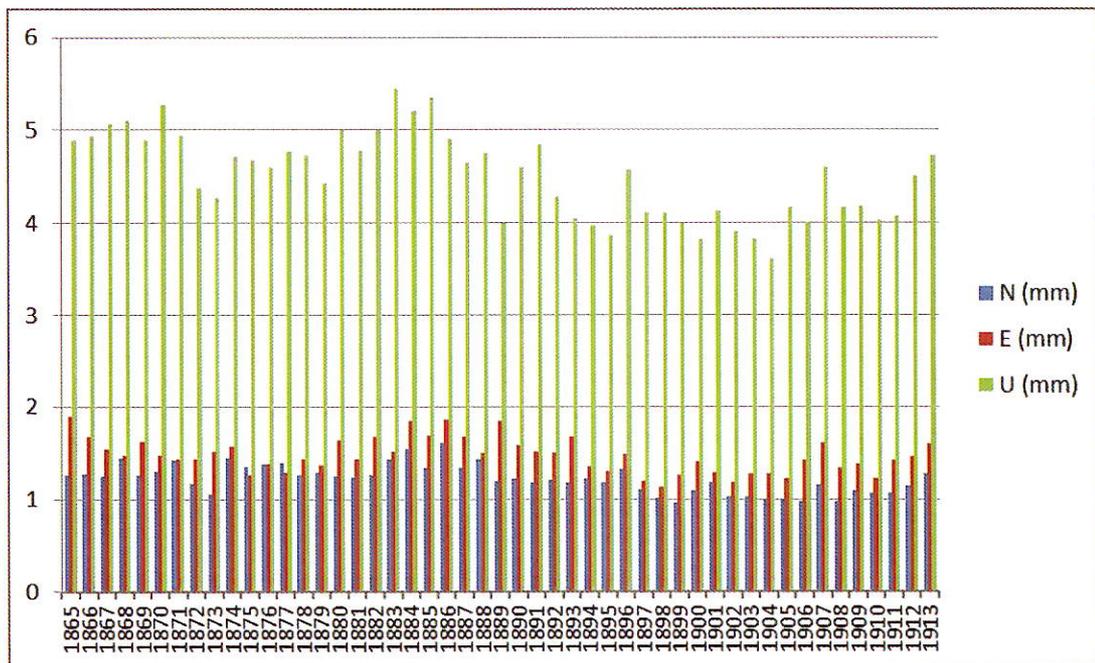


Figura 2. Repetibilidad de la solución semanal del CEPGE, periodo GPS Week 1865 - 1913.

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CUASIGEOIDE PARA EL ECUADOR CONTINENTAL APLICANDO LA TEORÍA DE MOLODENSKY

Barahona, C¹ & Tierra, A²

¹Gestión de Geoinformación • Instituto Geográfico Militar • Quito • Ecuador
²Grupo Geoespacial • Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE • Sangolquí - Ecuador
Email: christian.barahona@mail.igm.com.ec • Telf: (+593) 3975100 • Ext.: 2012
Email: artierra@espe.edu.ec • Móvil: 0996651440

Resumen

El modelamiento de la figura terrestre a través de la determinación del geoide, presenta dificultades debido a la imposibilidad de medir la gravedad en el interior de la Tierra, conllevando al planteamiento de diversas hipótesis referentes a la distribución interna de las masas terrestres. Para obviar estas hipótesis es utilizada la teoría de Molodensky la cual considera a la superficie topográfica como la tierra real y proponiendo al cuasigeoide como una superficie auxiliar. La distancia entre el cuasigeoide y la superficie terrestre corresponde a las alturas normales, próximas a las alturas ortométricas. Mientras que la separación entre el elipsoide y el cuasigeoide es conocida como anomalía de altura. El desarrollo de las técnicas satelitales de posicionamiento, permite desarrollar en la actualidad la teoría de Molodensky, pues se requiere de la utilización conjunta de mediciones geodésicas y gravimétricas en la superficie terrestre. El presente proyecto tiene como objetivo establecer la metodología para determinar el cuasigeoide del Ecuador continental. Para lo cual, se basó en los registros de desnivel, GPS de precisión y gravedad correspondientes a la Red de Nivelación del Ecuador proporcionados por el Instituto Geográfico Militar. De manera inicial, se desarrolló una red de números geopotenciales, donde los valores de gravedad inexistentes fueron obtenidos mediante interpolación gravimétrica a través de anomalías de Bouguer. Estos números geopotenciales fueron ajustados utilizando el Método de los Mínimos Cuadrados. Posteriormente se calcularon las alturas normales para determinar las anomalías de altura y generando el modelo cuasigeoidal para el Ecuador continental.

Palabras Clave: Cuasigeoide, teluroide, anomalías de altura, números geopotenciales.

Abstract

The modeling of the Earth's figure through geoid determination presents difficulties due to the inability to measure gravity in the interior of the Earth, leading to approach various hypotheses concerning the internal distribution of land masses. To avoid these hypotheses is used the theory of Molodensky which considers the topographic surface as the actual land and proposing to quasigeoid as an auxiliary surface. The distance between the Earth's surface and the quasigeoid is known as normal heights, which are close to the orthometric heights. While the separation between the ellipsoid and the quasigeoid is known as height anomalies. The development of global navigation satellite system can now develop the theory of Molodensky, because it requires the joint use of geodetic and gravimetric measurements on the Earth's surface. This project aims to establish the methodology for determining the continental Ecuador's quasigeoid. For that, it is based on records of altitude, GPS and gravity corresponding for the Ecuador's Network Levelling provided by the Military Geographical Institute. Initially it developed a network of geopotential numbers, where nonexistent gravity values were obtained by gravimetric interpolation through Bouguer anomalies. These geopotential numbers were adjusted using the Method of Least Squares. Finally, the normal heights were calculated to determine the height anomalies and generate the continental Ecuador's quasigeoidal model.

Keywords: Quasigeoid, telluroid, height anomalies, geopotential numbers.

Introducción

El geoide ha sido el foco principal de muchas investigaciones por lo que se han generado varios métodos para poder determinarlo, debido a que todas las mediciones geodésicas deben ser reducidas hacia él, para lo cual se aplica el método tradicional o conservador de la integral de Stokes. Este método se ha utilizado debido a que el geoide es la representación del geopotencial terrestre y permite obtener una intuición geométrica dentro de los problemas geodésicos (Heiskanen & Moritz, 1985). La solución de Stokes se basa en dos premisas importantes: que no existan masas atrayentes fuera del geoide y que la gravedad debe ser medida en esta superficie (Moritz & Yurkina, 2000). Por lo tanto para el desarrollo de este método, se deben conocer o estimar de alguna manera, la densidad de las masas entre el geoide y la superficie terrestre, lo cual resulta prácticamente imposible, siendo necesario plantear diferentes hipótesis al respecto. Por lo tanto, el método de Stokes presenta un serio inconveniente, en el que los datos de gravedad observados en la superficie terrestre deben ser reducidos hacia el geoide, para lo cual se necesita conocer la geometría y la densidad de la Tierra (Sevilla, 1987).

En el año de 1945, el geodesta ruso Mikhail Ser-

geevich Molodensky propone un método alternativo al de Stokes, demostrando que es imposible determinar el geoide, como resultado de que las ondulaciones geoidales y las alturas ortométricas pueden ser obtenidas con precisión (Novotný, 1998). También menciona que la tarea fundamental de la Geodesia es determinar el campo gravitacional externo y la superficie terrestre (Moritz & Yurkina, 2000), donde se incluyen las alturas normales, cercanas a las ortométricas, pero que puedan ser medidas con mayor facilidad; y, de la misma forma se determinan las anomalías de altura, que representan el rol de la ondulación geoidal, pero que se encuentran referidas a la superficie terrestre. Con el desarrollo de los Sistemas de Navegación Global – GNSS, actualmente es posible determinar las alturas elipsoidales y generar un cambio fundamental para la determinación de la superficie terrestre, sin utilizar la densidad de la corteza. De esta forma, se abandonan los intentos de determinar el geoide, debido al cambio de superficie de referencia hacia el elipsoide, implicando que las anomalías de gravedad y las desviaciones de la vertical sean referidas al terreno y ya no al nivel del mar (Heiskanen & Moritz, 1985). Las perturbaciones de gravedad son un ejemplo de dicho cambio de superficie, pues se traslada a la topografía terrestre los valores reales y teóricos de gravedad, con el objetivo de compararlos en la misma superficie, sin



Figura 1. Red de nivelación geométrica del Ecuador continental.

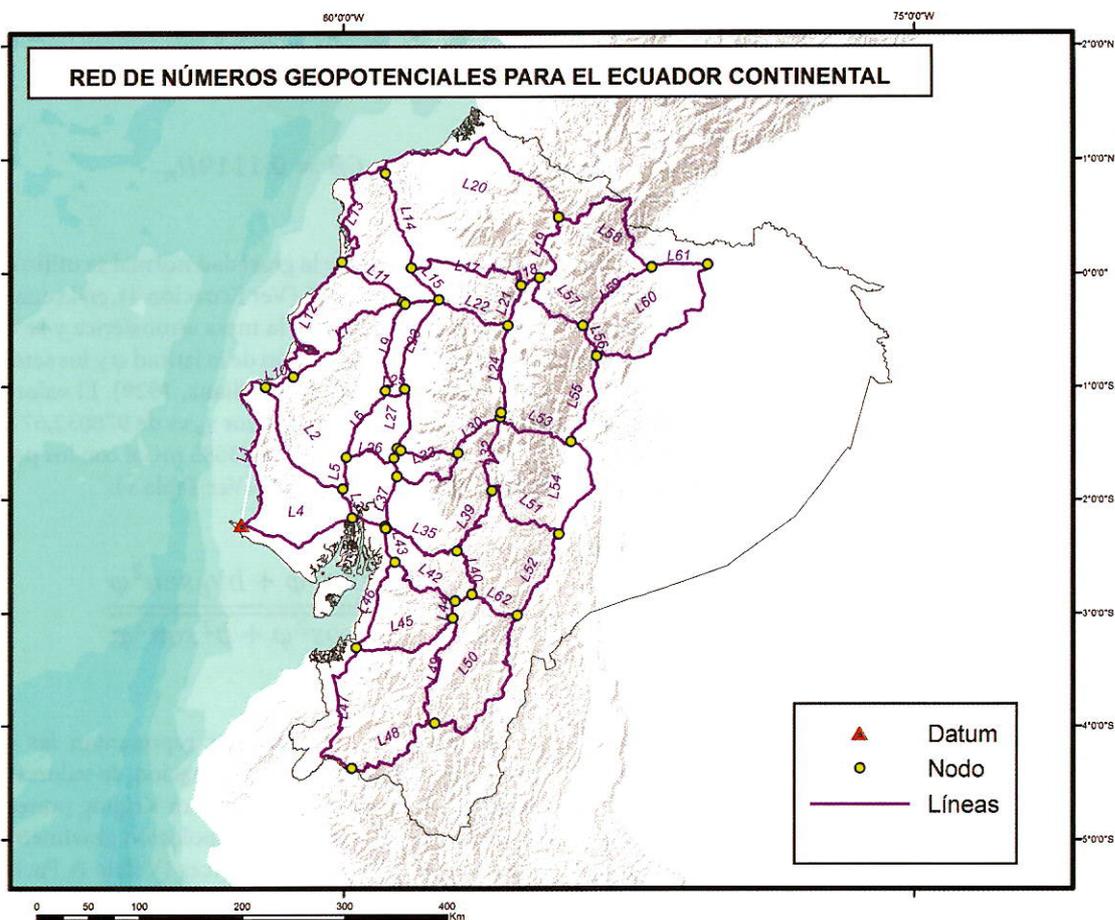


Figura 2. Red preliminar de números geopotenciales del Ecuador continental.

realizar formulaciones en cuanto a la densidad de las masas terrestres (Pedraza & Tocho, 2011).

Con la teoría de Molodensky se alcanza una nueva etapa en el modelamiento de la figura terrestre, ya que determinar el geode únicamente por métodos geodésicos y sin usar hipótesis sobre la estructura terrestre es completamente imposible. Esta metodología permite estudiar de una manera alternativa la superficie física de la Tierra junto a su campo gravitacional exterior, proporcionando un buen desarrollo científico y práctico sin la utilización de hipótesis. Esto permitirá que los errores en la precisión de los trabajos, depende exclusivamente de las mediciones geodésicas y gravimétricas obtenidas, mas no de la teoría utilizada (Zakatov, 1997). La presente teoría, planteada en 1945, puede ser desarrollada de manera eficiente en la actualidad, debido a las técnicas satelitales de posicionamiento GNSS para establecer un elipsoide de referencia. Esta metodología permite utilizar conjuntamente todas las mediciones realizadas en la superficie terrestre (p.ej.: nivelación, gravimetría) con las técnicas satelitales para posición. Esto conlleva a una combinación de métodos geométricos y físicos para resolver problemas geodésicos con una solvente base matemática.

Metodología

Los datos necesarios para la elaboración del presente trabajo corresponden a valores de desnivel, gravedad observada y posicionamiento global satelital de precisión, por lo que, inicialmente se realizó el análisis de los datos de la red oficial de nivelación geométrica del Ecuador, con la finalidad de determinar los insumos para el desarrollo de una red preliminar de números geopotenciales, sobre la cual se obtengan alturas normales para el territorio continental ecuatoriano.

La red de nivelación geométrica consta de 5055 puntos que se encuentran distribuidos en 100 líneas y 92 nodos (Ver Figura 1), de lo cual, 2389 puntos cuentan con medición de gravedad en la superficie y 1475 datos tienen coordenadas de precisión. Al unificar las tres variables necesarias, únicamente 818 puntos reúnen los tres tipos de datos obligatorios para el desarrollo del modelo cuasigeoidal.

Debido a esto, para la conformación de la red de números geopotenciales, se consideraron determinados factores como la tolerancia de las líneas; la ausencia de rastreos de posicionamiento de precisión en varios puntos de la red; y, la falta de datos de gra-

vedad para el cálculo del desnivel geopotencial. Las soluciones que se plantearon para resolver los inconvenientes, fueron modificar en determinadas líneas su sentido, así como omitir puntos o placas a través de la sumatoria del desnivel hacia la siguiente placa, donde se disponga de la información requerida y unir varias líneas de la red de nivelación para conformar una nueva. De este modo, con las medidas adoptadas para solucionar la falta de información, la tolerancia de la red de nivelación utilizada fue de 8,4 mm \sqrt{k} para establecer las líneas de la red preliminar de números geopotenciales, realizando el descarte y unificación de líneas, así como la eliminación de puntos sin valores de posición, la red preliminar de números geopotenciales quedó establecida a través de 3933 puntos, distribuida en 62 líneas y 41 nodos (Ver Figura 2).

En los puntos correspondientes a las nuevas líneas conformadas, se obtuvieron 1812 registros sin valores de gravedad observada en la superficie terrestre. Para una generación eficiente de la red de números geopotenciales, es preciso contar con valores gravimétricos en los respectivos desniveles; por lo tanto se planteó estimarla en los puntos donde no existía, mediante el cálculo inverso a través de anomalías de Bouguer simple (Ver Ecuación 1), donde g_{int} es la gravedad interpolada en la superficie terrestre; CAL es la corrección de aire libre; γ_Q es la gravedad normal; y, CB corresponde a la corrección de la lámina de Bouguer.

$$g_{int} = \Delta g_{BC} - C\Delta L + \gamma_Q - CB \quad 1)$$

El valor aproximado de la corrección de aire libre para el Ecuador (Ver Ecuación 2), se encuentra en función de la altura nivelada H_n (en metros) de cada punto (Tierra, 2003):

$$C\Delta L_E = 0,307716H_n - 7,21 \times 10^{-8}H_n^2 \quad 2)$$

La reducción de Bouguer se obtuvo con una densidad estándar de 2,67 g/cm³, y está en función de la altura nivelada de la estación (Ver Ecuación 3).

$$CB = 0,1119H_n \quad 3)$$

Para el cálculo de la gravedad normal se utilizó la ecuación de Somigliana (Ver Ecuación 4), en la cual se incluye la gravitación de la masa atmosférica y se encuentra definida en función de la latitud φ y los semiejes del elipsoide a y b (Somigliana, 1929). El valor de gravedad normal en el ecuador γ_a es de 978032,67715 mGal y en el polo γ_b 983218,63685 mGal con los parámetros del elipsoide GRS80 (Ver Tabla 1).

$$\gamma = \frac{a\gamma_a \cos^2 \varphi + b\gamma_b \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad 4)$$

Las anomalías de Bouguer representan las variables más estables para la estimación de valores de gravedad, mientras que el estimador Kriging presenta óptimos resultados para la interpolación gravimétrica a través de técnicas geoestadísticas (Villela & Pacino, 2010) y (Coyago, 2010). Para el estudio, el modelo de anomalías de Bouguer simple (Ver Figura 3) fue desarrollado y validado a través de una base de datos adicional con 1623 puntos, en los cuales se dispuso de datos de gravedad observada y GPS de precisión. La interpolación fue realizada a través del método geoestadístico Kriging y se unificaron los registros al sistema de mareas *tide free*. Para obtener la altura nivelada en el cálculo de las correcciones de aire libre y de Bouguer, se utilizó el modelo geoidal geométrico del Ecuador continental desarrollado por el Instituto Geográfico Militar.

Los desniveles, al no presentar ninguna corrección (p. ej.: corrección lunisolar) se hallaban en el

Tabla 1. Parámetros del elipsoide GRS 80.

PARÁMETRO		VALOR	UNIDAD
a	Eje mayor	6378137	m
b	Eje menor	6356752,3141	m
f	Achatamiento	0,003352810681	
m	$\omega^2 a^2 b^2 / GM$	0,00344978600308	
ω	Velocidad angular	7292115×10^{-11}	rad/s
GM	Constante gravitacional geocéntrica	3986005×10^5	m ³ /s ²

Fuente: Moritz, 1984.

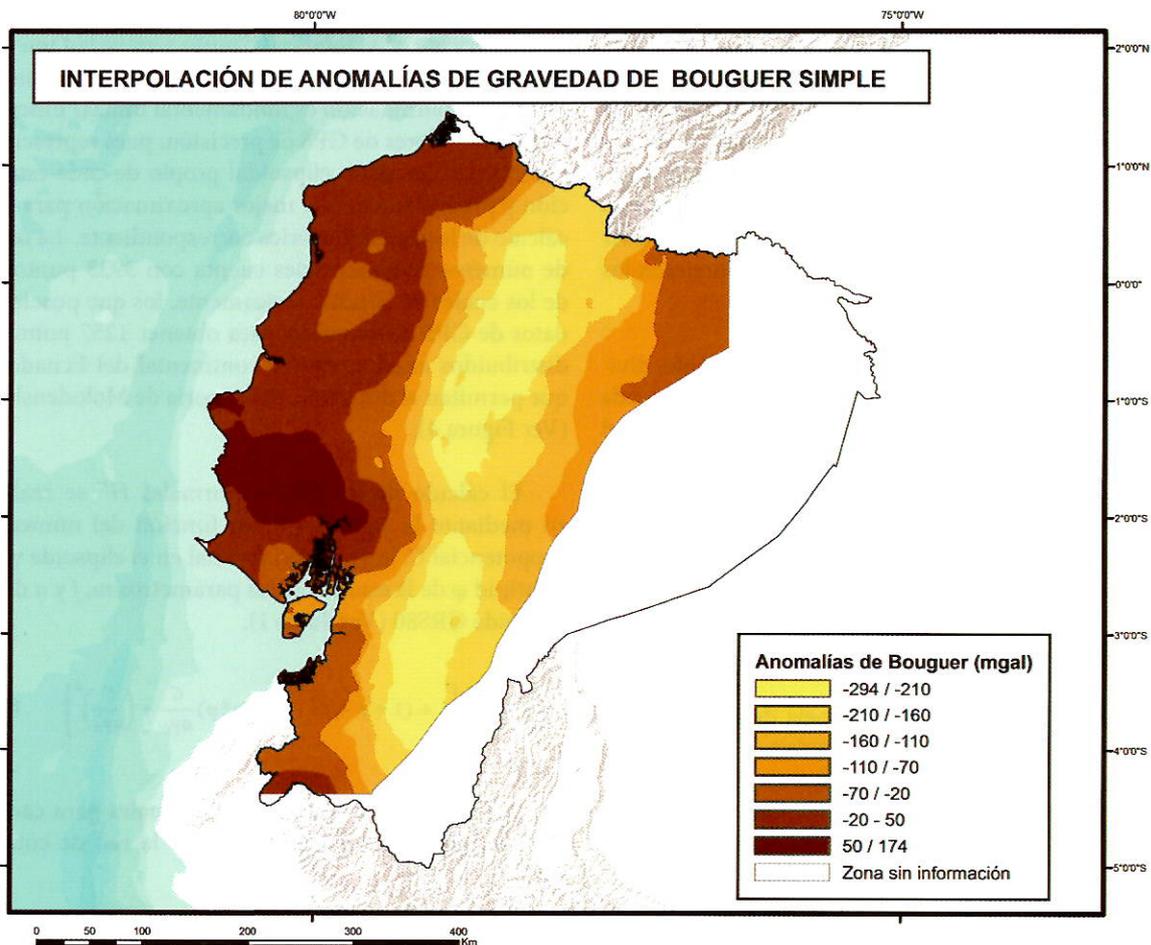


Figura 3. Mapa de interpolación de anomalías de gravedad de Bouguer simple.

sistema *mean tide* (Mäkinen & Ihde, 2007); y de la misma forma los datos de gravedad, tanto observada como interpolada, al encontrarse referidos al sistema IGSN71. De acuerdo a resolución de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) en el año 1984 (Petit & Luzum, 2010), debido a la necesidad de un tratamiento uniforme de las correcciones de mareas para mediciones geodésicas y gravimétricas, se recomendó no remover el efecto indirecto, por lo tanto utilizar *zero tide* para cantidades asociadas con geopotencial (p. ej.: geoide, gravedad, anomalías de gravedad) y *mean tide* para valores asociados con desplazamientos de estaciones. Pero estas recomendaciones no han sido implementadas en el análisis de valores geodésicos en general; por lo tanto se tiene los valores de posicionamiento, a través del International Terrestrial Reference Frame, en el sistema tradicional *tide free*. De esta forma, se estableció para el presente proyecto el sistema de mareas *tide free*, siendo necesario unificar los valores de la componente vertical y obtener un modelo consistente.

De esta forma, para la transformación desde el sistema de mareas *mean tide* al *tide free* para los componentes verticales se utilizaron los números de Love *k* y *h*, con valores 0,3 y 0,62 respectivamente (Ekman, 1988). En los valores de gravedad resultó necesario

remover el término de Honkasalo, realizando la transformación en función de la latitud φ que se encuentra en microgales (Ver Ecuación 5).

$$g_{mean} - g_{free} = 1,17(-30,4 + 91,2\text{sen}^2\varphi) \quad 5)$$

Del mismo modo, para convertir datos provenientes de nivelación, se debe determinar la corrección en función de dos estaciones, una al norte con latitud φ_n y otra al sur con latitud φ_s , es expresada en centímetros (Ver Ecuación 6).

$$\Delta H_{mean} - \Delta H_{free} = 20,128(\text{sen}^2\varphi_n - \text{sen}^2\varphi_s) \quad 6)$$

Posteriormente, se calculó la gravedad media *g* entre dos estaciones para multiplicarlo por su diferencia de nivel *dn* correspondiente y obtener el desnivel de número geopotencial ΔC (Ver Ecuación 7).

$$\Delta C = \int_0^P g \cdot dn \quad 7)$$

La red de números geopotenciales, fue conformada por 21 anillos que determinaron las ecuaciones de condición para el ajuste de los errores de cierre de cada línea mediante el método correlativo de mínimos cuadrados (Gemael, 1994). El modelo matemático en cada anillo se generó en base a la sumatoria de desniveles de las líneas conformantes, y se utilizó el inverso de la distancia de cada línea para la matriz de pesos. Una vez realizado el ajuste se obtuvieron los desniveles geopotenciales de cada línea.

Finalizado el ajuste, se distribuyó el residuo, dividiéndolo para el número de puntos existentes en cada línea. El datum de la red vertical de nivelación es el mismo para la red de números geopotenciales, seleccionándose como cota inicial el valor preliminar de 6,1334 ugp, obtenido a través de alturas ortométricas de Helmert (Cañizares, 2015). Dicho valor se adicionó a los desniveles geopotenciales dentro de cada línea de la red, para obtener finalmente, los números geopotenciales C de cada placa.

Para desarrollar la metodología de la teoría propuesta por Molodensky, los requisitos primordiales son los rastreos obtenidos sobre la superficie terrestre. La red de números geopotenciales fue diseñada mediante una combinación de coordenadas obtenidas

con GPS de precisión y navegador, así como de gravedad observada en la topografía junto a gravedad interpolada a través de anomalías de gravedad de Bouguer simple. A continuación es fundamental utilizar únicamente los valores de GPS de precisión, pues representan el valor de altura elipsoidal propio de cada estación y proporcionan una mejor aproximación para el cálculo de la gravedad teórica correspondiente. La red de números geopotenciales cuenta con 3933 puntos, de los cuales se filtraron únicamente, los que poseían datos de GPS de precisión para obtener 1257 puntos distribuidos en el territorio continental del Ecuador que permitan el desarrollo de la teoría de Molodensky (Ver Figura 4).

El cálculo de las alturas normales H^N se realizó mediante la ecuación 8, en función del número geopotencial C, la gravedad normal en el elipsoide γ_0 , la latitud ϕ de la estación y los parámetros m, f y a del elipsoide GRS80 (Ver Tabla 1).

$$H^N = \frac{C}{\gamma_0} \left[1 + (1 + f + m - 2f \text{sen}^2 \phi) \frac{C}{a\gamma_0} + \left(\frac{C}{a\gamma_0} \right)^2 \right] \quad 8)$$

Así se calcularon las alturas normales para cada estación de los datos disponibles de la red de cotas

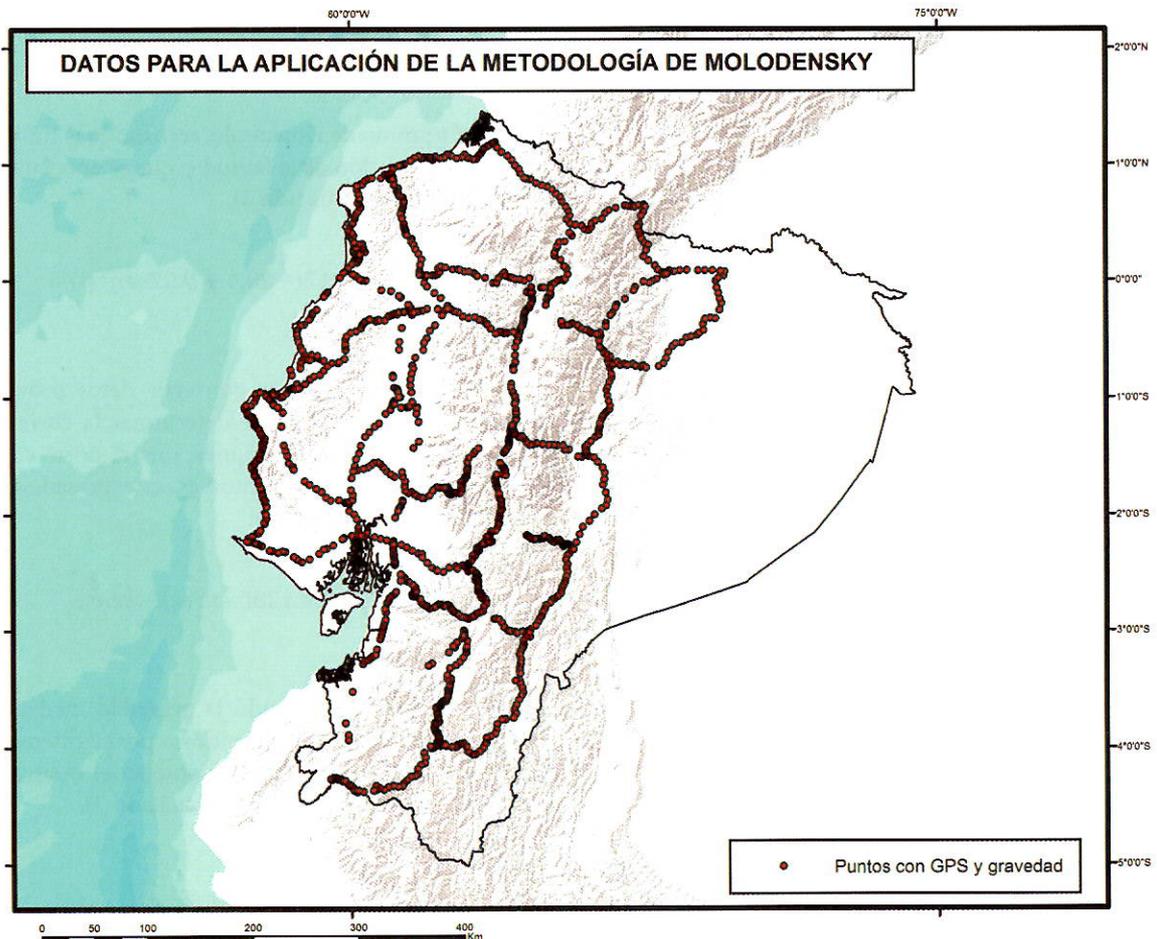


Figura 4. Datos de la red preliminar de números geopotenciales para aplicar la metodología de Molodensky.

geopotenciales y se generó un modelo digital de terreno de alturas normales. Como siguiente paso se generó una diferencia geométrica entre estas, donde la anomalía de altura ζ será determinada en función de la altura elipsoidal h y la altura normal H^N (Ver Ecuación 9).

$$\zeta = h - H^N \quad 8)$$

Resultados y discusiones

Lo óptimo para obtener una red de números geopotenciales, consiste en tener valores de gravedad entre cada desnivel existente. Analizando ambas categorías de datos, es donde se obtuvo mayor cantidad de dificultades para desarrollar el proyecto. La red de control vertical del país, comprendida en 100 líneas y 92 nodos, fue depurada hasta contar con 62 líneas

y 41 nodos, mediante criterios como inexistencia de nodos de enlace entre líneas o que conexión a líneas que no entraron en tolerancia de $8,4 \text{ mm } \sqrt{k}$. Se consideró omitir la mayor cantidad de puntos sin dato gravimétrico, apreciando, únicamente, en los puntos que resultase estrictamente necesario, omitiendo estimaciones de gravedad hasta un máximo de 10 km de distancia, siempre que entre dos placas no se superen los 2 km (Coyago, 2010). Esto fue pensado para reducir errores sistemáticos influyentes en el ajuste de la red debido a la interpolación gravimétrica, pero generó que apenas se cuente con 793 datos con GPS de precisión, fundamentales para el desarrollo de la teoría de Molodensky, por lo cual se utilizaron los 3933 puntos iniciales, conllevando a estimar el valor de gravedad en los 1812 registros mencionados anteriormente.

Al obtener gravedad interpolada en los puntos faltantes y el posterior cálculo y multiplicación de la gravedad media entre dos placas contiguas, con su

Tabla 2. Estadísticas de los errores de cierres para el ajuste de la red.

MÁXIMO (ugp)	0,3141
MÍNIMO (ugp)	-0,7234
MEDIA (ugp)	-0,034

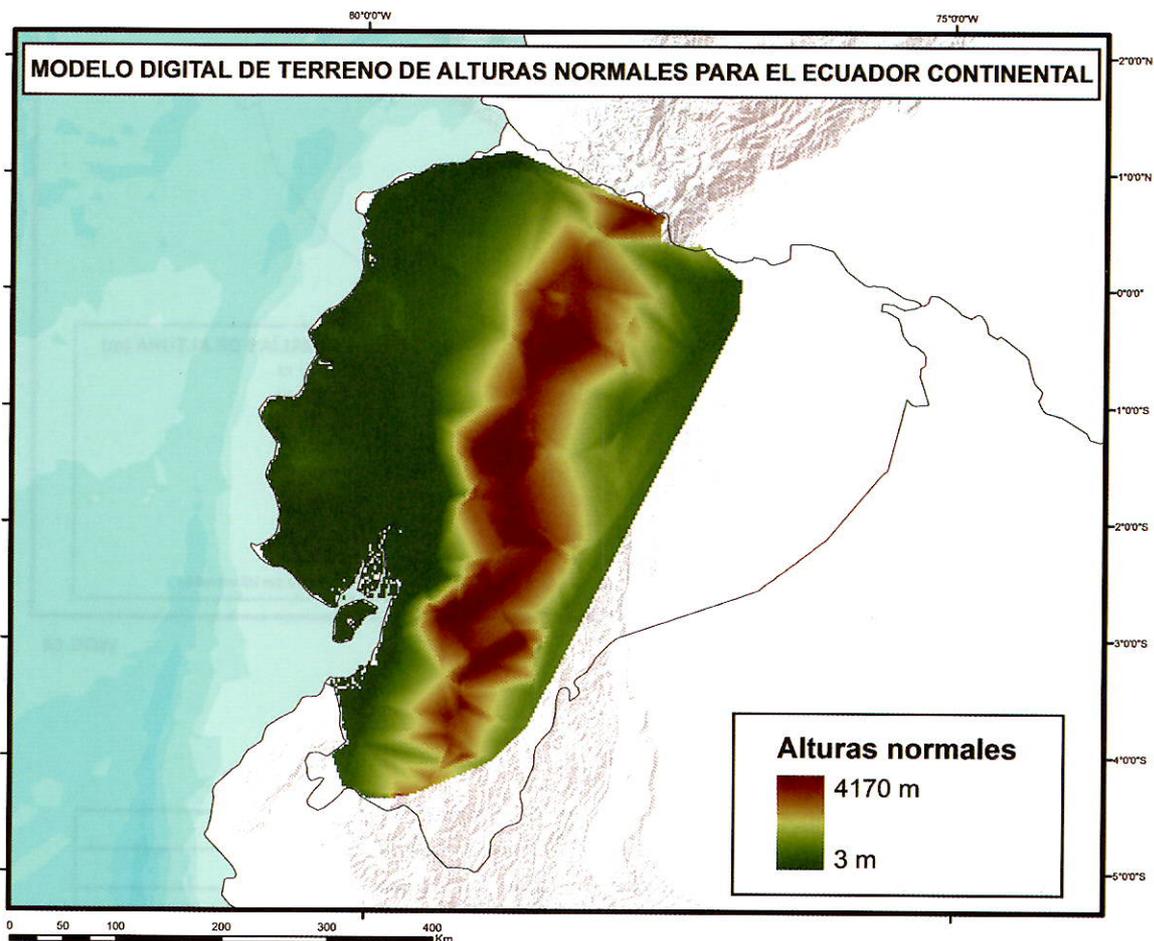


Figura 5. Modelo digital del terreno de alturas normales para el Ecuador continental

Tabla 3. Estadísticas de los residuos después del ajuste de la red.

MÁXIMO (ugp)	0,388
MÍNIMO (ugp)	-0,087
MEDIA (ugp)	0,019

respectiva diferencia de alturas niveladas, se obtuvo el desnivel geopotencial. Se estableció el sistema *tide free* debido al posterior uso de valores de posición vinculados a dicho sistema. Los errores de cierre de los anillos de la red se establecieron utilizando las ecuaciones de condición y las estadísticas del desnivel estimado de las líneas se detallan en la tabla 2.

Al realizar el ajuste se obtuvieron los residuos, correspondientes al valor ajustado menos el valor estimado inicialmente en cada línea de la red. Las estadísticas de los residuos se muestran en la tabla 3.

A partir de la red de números geopotenciales, se seleccionaron los registros necesarios para desarrollar la teoría de Molodensky, donde se utilizaron, exclusivamente, los valores con posicionamiento mediante rastreos satelitales, llegando a obtener 1257 puntos para el desarrollo que ya poseían su respectiva cota geopotencial, calculada posteriormente al ajuste de la red, y con la designación de la cota inicial o número geopotencial del datum. Con dichos datos, se calcularon las alturas normales y con éstas, se generó un modelo digital de terreno para el Ecuador continental

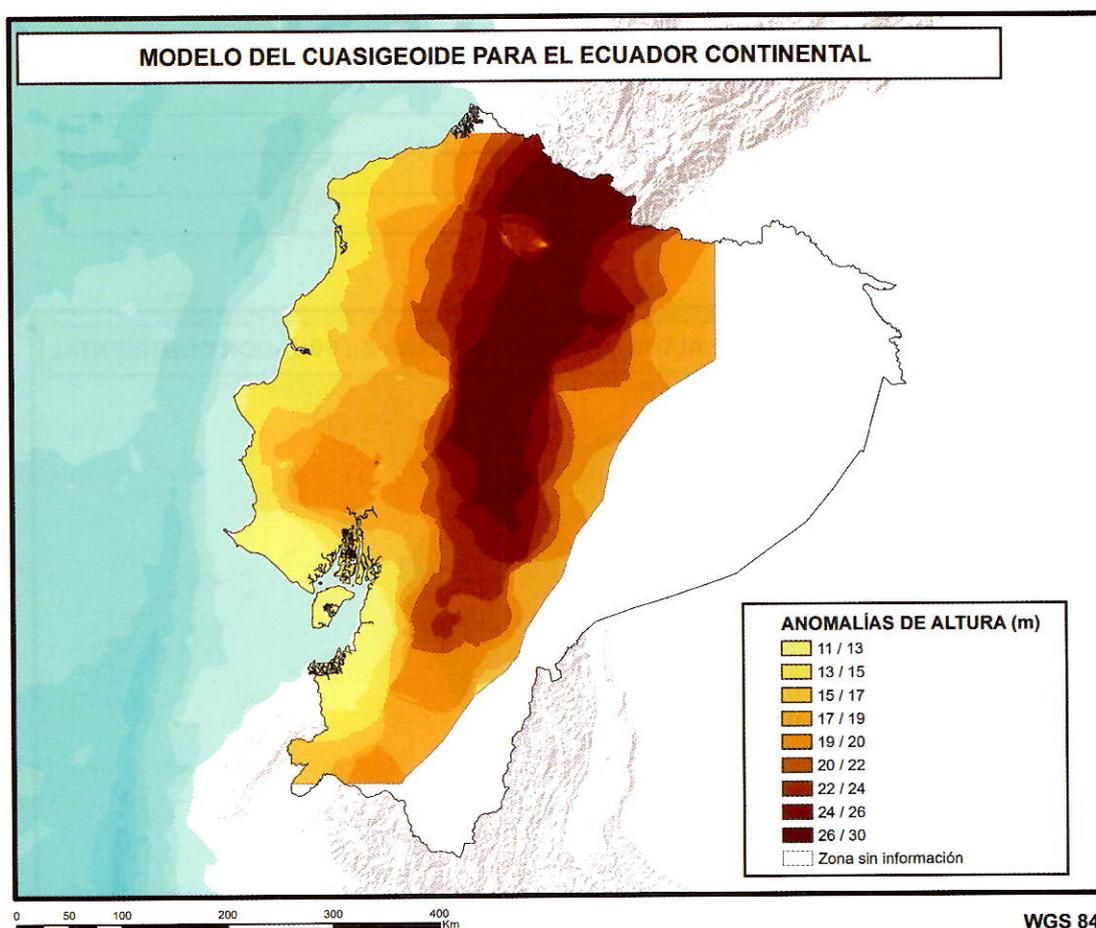


Figura 6. Modelo del cuasigeoide para el Ecuador continental.

Tabla 4. Estadísticas de las alturas normales

MÁXIMO (m)	4209,22
MÍNIMO (m)	2,64
MEDIA (m)	1176,31
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (m)	1188,89

Tabla 5. Estadísticas de las anomalías de altura

MÁXIMO (m)	30,23
MÍNIMO (m)	10,68
MEDIA (m)	20,35
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (m)	4,51

(Ver Figura 5). Las estadísticas obtenidas de las alturas normales se indican en la tabla 4.

Al relacionar las alturas normales obtenidas junto a la respectiva altura elipsoidal en cada punto mediante la ecuación 9, se alcanzaron las anomalías de altura a través del interpolador Kriging, reflejando el modelo cuasigeoidal para el Ecuador continental (ver figura 6). La tabla 5 refleja las estadísticas obtenidas en las anomalías de altura.

Conclusiones

El desarrollo de la metodología de Molodensky requiere de rastreos sobre la superficie terrestre, especialmente de valores de GPS de precisión, los cuales deben ser complementados con datos gravimétricos para la generación previa de las cotas geopotenciales. Para la red preliminar de números geopotenciales se obtuvieron 3933 puntos distribuidos en 62 líneas y 42 nodos; como resultado de una depuración de 16 líneas de la red de nivelación.

Se debieron tomar decisiones como incluir valores de navegador en determinados puntos que no contaban con coordenadas de precisión, lo cual significó el 68% de observaciones; así como interpolar valores de gravedad ante la ausencia del 46% de puntos sin registros gravimétricos dentro de la red. Esto dificulta seriamente la precisión de los productos generados, puesto que la exactitud de la teoría de Molodensky depende exclusivamente de los datos observados sobre la superficie terrestre. Por lo tanto es necesario contar con los tres tipos de datos (desnivel, posición de precisión y gravedad) en cada placa o estación, para evitar utilizar valores de navegador o gravedad interpolada que influyen negativamente en la precisión final del proyecto.

En el desarrollo de la teoría de Molodensky, los estadísticos alcanzados con el modelo digital de terreno de alturas normales fueron de 4209,22 metros como máximo y 2,64 metros como mínimo. Se obtuvo una media de 1176,31 metros con desvío estándar de 1188,89 metros.

El modelo cuasigeoidal del Ecuador continental se desarrolló a través de la diferencia de alturas elipsoidales con alturas normales, obteniendo las anomalías de altura. Se alcanzó un valor máximo de 30,23

metros y un mínimo de 10,68 metros; mientras que el valor medio para el territorio continental correspondió a 20,35 metros con un desvío de 4,51 mgal.

Estimar valores gravimétricos representa una alternativa que no confiere la confianza necesaria de alcanzar resultados confiables. En este caso, aunque se depende de suposiciones propias de la teoría de Stokes, lo recomendable es calcularlas a través de anomalías de Bouguer, cuidando el manejo de los datos a utilizarse.

La unificación de los sistemas de mareas es fundamental en el manejo de valores geodésicos y gravimétricos, pues el tratamiento uniforme de las correcciones de mareas evitará generar modelos inconsistentes, que resultasen imprecisos como pueden ser modelos geoidales o cuasigeoidales, donde intervienen combinaciones de datos gravimétricos junto a posición y desnivel.

Trabajos citados

- Cañizares, E. (2015). Análisis del sistema de alturas para la red de control básico vertical del Ecuador. Tesis de Grado. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Coyago, R. (2010). Ajuste de la red de control básico vertical en función de números geopotenciales. Tesis de Grado. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.
- Ekman, M. (1988). The impact of Geodynamic phenomena on systems for height and gravity. Ebeltoft: Nordic Geodetic Commission.
- Gemael, C. (1994). Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba: Editora da UFPR.
- Heiskanen, W., & Moritz, H. (1985). Geodesia Física (Primera ed.). Madrid: Instituto Geográfico Nacional de España.
- Mäkinen, J., & Ihde, J. (2007). The permanent tide in height systems. En M. Sideris, Observing our Changing Earth: Proceedings of the 2007 IAG General Assembly. Berlin: Springer-Verlag.
- Moritz, H. (1984). Geodetic Reference System 1980. Journal of Geodesy.
- Moritz, H., & Yurkina, M. (2000). M.S. Molodensky in memoriam. Graz: Universität Graz.
- Novotný, O. (1998). Motions, Gravity field and figure of the Earth. Salvador: Universidade Federal da Bahia.
- Pedraza, A., & Tocho, C. (2011). Análisis de nuevos estándares para reducir datos de gravedad: aplicación en Tierra de Fuego. La Plata: Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas.

- Petit, G., & Luzum, B. (2010). IERS Conventions, Technical Note No. 36. Frankfurt: International Earth Rotation and Reference Systems Service.
- Sevilla, M. (1987). Introducción al problema clásico de Molodensky. Madrid: Instituto de Astronomía y Geodesia.
- Somigliana, C. (1929). Teoria generale del campo gravitazionale dell' ellisoide di rotazione (Cuarta ed.). Milano: Memorie della società astronomica italiana.
- Tierra, A. (2003). Metodología para a Geração da Malha de Anomalias Gravimétricas para obtenção de Geoide Gravimétrico Local a partir de Dados Esparsos. Tesis doctoral. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- Villela, J., & Pacino, M. C. (2010). Interpolación gravimétrica para el cálculo de los números geopotenciales en la red altimétrica de Argentina en zonas de alta montaña. Rosario: Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas.
- Zakatov, P. (1997). Curso de Geodesia Superior. Madrid: Rubiños 1860.

SISTEMA DE ALTURAS PARA EL ECUADOR

Cañizares, E¹; Tierra, A; Leiva, C²; Staller, A & Pallero, J. L. G.³

¹Instituto Geográfico Militar • Quito - Ecuador

²Grupo de Investigación Geoespacial • Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE • Sangolquí - Ecuador

³ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía • Universidad Politécnica de Madrid • Madrid - España

Email: eccarolina.c@gmail.com; Email: artierra@espe.edu.ec; Email: caleiva@espe.edu.ec; Email: a.staller@upm.es; Email: jlg.pallero@upm.es

Resumen

El correcto establecimiento, observación, cálculo y compensación de la red vertical que materializa el sistema de altitudes en un país son tareas de importancia práctica fundamental para el desarrollo económico y social del territorio. Tradicionalmente, uno de los sistemas de altitudes más utilizado en la práctica es el denominado sistema de altitudes ortométricas, que es aquél en el que dicha coordenada queda definida por la línea de la plomada de cada lugar de observación. En este trabajo se realiza una primera aproximación a la determinación rigurosa de altitudes ortométricas de Helmert en la Red de Control Básico Vertical del Ecuador. Para ello se ha llevado a cabo el procesado de las observaciones de nivelación geométrica y de gravedad de tres polígonos, dando así un primer paso hacia un futuro trabajo de ajuste global de la Red Vertical del Ecuador.

Palabras Clave: Nivelación geométrica, altitud ortométrica de Helmert, gravedad, superficie equipotencial, geoide, Ecuador.

Abstract

The right setting, observation, calculation and compensation of the vertical networking that materializes the height system in a country constitute the tasks of fundamental practical importance for the economic and social development of the territory. Traditionally, one of the most frequently used height system in practice is the so-called orthometric height system in which such coordinate is defined by the plumb line of each observation point. This paper attempts a first approach to the strict determination of the Helmert Orthometric Heights in the Vertical Basic Control Network of Ecuador. For this purpose, the processing of gravity and geometric leveling observation of three sites has been conducted. In this way, this paper takes first step to a future work of general adjustment of the Vertical Basic Control Network of Ecuador.

Keywords: Geometric levelling, Helmert orthometric height, gravity, equipotential surface, geoid, Ecuador.

Introducción

En el Ecuador, el Instituto Geográfico Militar (IGM), institución rectora de la generación de información geodésica, maneja una Red de Control Básico Vertical basada únicamente en altitudes niveladas, cuyo Datum Vertical se ubica en el mareógrafo de La Libertad, provincia de Santa Elena, y cuyo establecimiento fue iniciado en el año 1948. Las nuevas tecnologías demandan cada vez de mayor precisión en las mediciones geodésicas, pero en el Ecuador y en el resto de países de América Latina las redes de nivelación han sido ajustadas asumiendo el efecto del campo de gravedad como un error más de medición [1]. Se conoce también que la distribución irregular de las masas en el interior de la Tierra hace que las superficies equipotenciales no sean equidistantes [2].

Todo esto genera que el esquema de la nivelación sea perturbado, ya que a lo largo de una misma superficie equipotencial el nivel no detecta variación alguna al pasar de un punto a otro, cuando en realidad la distancia de estos puntos a la misma superficie de referencia a lo largo de la línea de la plomada (altitud ortométrica) puede ser distinta. Como consecuencia, el desnivel obtenido entre dos puntos depende del camino por donde se realiza el itinerario de nivelación, o lo que es equivalente, el desnivel medido a lo largo de un itinerario cerrado no será cero. Esta dependencia del valor de la altitud de un punto respecto del camino de nivelación genera una indeterminación que no es admisible en nivelación de alta precisión, por lo que en grandes redes que abarquen territorios amplios es necesario corregirla [3].

Fundamentos teóricos

A. Superficies de Referencia

Las superficies de referencia manejadas en Geodesia son fundamentalmente tres: la superficie física o topográfica, que es donde se realizan las mediciones, la superficie de un modelo matemático (generalmente un elipsoide de revolución) y el geoide [4], al cual se refieren los sistemas de altitudes ortométricas.

El modelo matemático de la Tierra utilizado en cálculos geodésicos es un elipsoide de revolución, generado por la rotación de una elipse alrededor de su semieje menor [5]. El elipsoide se encuentra caracterizado por cinco constantes geométricas: a (semieje mayor), f (aplanamiento) y ΔX , ΔY , ΔZ (coordenadas del origen del elipsoide respecto al centro de masas de la Tierra); y por tres parámetros físicos: GM (constante gravitacional geocéntrica de la Tierra), J_2 (factor de forma dinámica de la Tierra) y ω (velocidad angular de rotación de la Tierra) [6].

El geoide, en cambio, es la superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre que más se

aproxima al nivel medio de los mares en calma, por lo que es elegido comúnmente como superficie de referencia o cota cero para los sistemas de altitudes en los distintos países. El nivel medio del mar definido en una estación mareográfica después de un cierto número de años de observaciones es válido para un lugar y durante un tiempo determinado [4], y es la aproximación generalmente utilizada para la determinación del geoide con respecto al punto o puntos fundamentales de referencia de una red estatal.

La separación vertical, medida a lo largo de la normal a la superficie del elipsoide, que existe entre el geoide y un elipsoide de referencia es conocida como ondulación o altitud geoidal. Dicha distancia depende del elipsoide con el que se trabaje, pero de forma aproximada su variabilidad está contenida en el intervalo ± 100 m [6]. La ondulación geoidal tiene una importancia capital al momento de transformar las altitudes sobre el elipsoide determinadas por técnicas GNSS en altitudes ortométricas.

B. Tipos de altitudes

Un punto en la superficie topográfica necesita de tres coordenadas para quedar totalmente definido en el espacio tridimensional. Las dos primeras se refieren a la posición planimétrica, mientras que la tercera coordenada será la altitud [3].

La altitud de un punto de la superficie topográfica es la distancia existente entre éste y una superficie de referencia, medida a lo largo de la línea normal a dicha superficie que pasa por el punto de trabajo [2]. Generalmente, el geoide es aceptado como la superficie equipotencial de referencia para los sistemas de altitudes [5].

Como se indicó previamente, las distintas superficies equipotenciales no son paralelas entre sí debido principalmente a que la distribución de masas en el interior de la Tierra no es homogénea. Este no paralelismo tiene como consecuencia el que el desnivel entre dos puntos obtenido únicamente por nivelación geométrica dependa del camino seguido por la línea de nivelación. Es por esto que el conjunto de operaciones de nivelación exigen el conocimiento de valores de la gravedad para la corrección de los desniveles observados [4].

Con este criterio, las altitudes utilizadas en Geodesia se clasifican en dos tipos: geométricas y físicas [2].

Altitudes Geométricas

Las altitudes niveladas y las altitudes elipsoidales son consideradas altitudes de tipo geométrico. Las altitudes niveladas son obtenidas mediante el proceso de nivelación, en el cual se observan los desniveles o

distancias existentes entre las superficies equipotenciales del campo de gravedad terrestre en el entorno donde se colocan los instrumentos de nivelación. En un proceso convencional de determinación de altitudes mediante nivelación geométrica el telescopio del instrumento es tangente a la superficie equipotencial local y la línea de la plomada coincide con el vector de la fuerza de gravedad, el cual es perpendicular a aquella superficie [2]. Las altitudes elipsoidales, por su parte, representan la separación entre la superficie topográfica y el elipsoide, y son calculadas sobre la línea normal a la superficie de este último [2]. Este tipo de altitudes son las obtenidas directamente a partir de observaciones GNSS.

Altitudes Físicas

Los valores de desnivel obtenidos en una nivelación pueden ser transformados a diferencias de potencial teniendo en cuenta la gravedad media a lo largo de la línea de la plomada que separa las dos superficies equipotenciales involucradas en dicho desnivel [8]. Las diferencias de potencial, a diferencia de los desniveles, serán siempre cero al ser sumadas en un circuito cerrado, ya que los valores de potencial son unívocos y dependen únicamente de la posición absoluta del punto [2].

A la diferencia de potencial entre un punto sobre una superficie equipotencial arbitraria y el geoide se la conoce como número o cota geopotencial [9], y se la determina partiendo de la integral

$$\int_0^A g dn = W_O - W_A = C \quad 1)$$

donde W_A y W_O son los potenciales gravitatorios para un punto A y para el geoide, respectivamente, g la gravedad, dn el desnivel y C la cota geopotencial. La integral de la expresión (1) es independiente del camino seguido en la nivelación [10] y el valor de C es constante a lo largo de una superficie equipotencial. Sus unidades son $\text{kgal}\cdot\text{m}$, magnitud llamada también unidad geopotencial (u.g.p.) [9].

Si a la cota geopotencial se la divide para un valor de referencia de la gravedad normal γ^{cte} , considerada generalmente como el valor de la gravedad a los 45° de latitud [9], es posible conocer la altitud dinámica a través de

$$H^D = \frac{C}{\gamma^{45^\circ}} \quad 2)$$

Si bien sus unidades son metros, este tipo de altitud no tiene significado geométrico alguno, siendo la

constante y cte simplemente un artificio que oscurece el verdadero significado de las cotas geopotenciales [10].

Ahora, si a la cota geopotencial se la divide para un valor medio de gravedad real a lo largo de la línea de la plomada entre el punto evaluado y el geoide, lo que se obtiene es la altitud ortométrica [2] a partir de

$$H^O = \frac{C}{\bar{g}} \quad 3)$$

Según el modo de estimación de la gravedad media \bar{g} en la expresión (3) es posible encontrarse ante distintos subtipos de altitudes ortométricas. En este trabajo se utilizarán las denominadas altitudes ortométricas de Helmert [8], cuyo cálculo se detallará más adelante.

Finalmente, se define el concepto de altitud normal como el cociente entre el número geopotencial y la gravedad normal media $\bar{\gamma}$ entre el punto de trabajo y el elipsoide a lo largo de la normal a este último [2] a través de:

$$H^N = \frac{C}{\bar{\gamma}} \quad 4)$$

Este tipo de altitud tiene un significado físico y geométrico menos obvio que la altitud ortométrica y depende del elipsoide de referencia utilizado, si bien es básico en las teorías modernas de la Geodesia Física [10].

Metodología

El primer paso para realizar el cálculo de las altitudes ortométricas, normales y dinámicas fue la recopilación de la información perteneciente al IGM. Dicha información consta de la nomenclatura del punto, sus coordenadas geodésicas, longitud de las líneas de nivelación, desniveles y gravedad observados.

En 1948 el IGM, con el asesoramiento y la colaboración del entonces IAGS (Interamerican Geodetic Survey), instaló un mareógrafo en el terminal petrolero de La Libertad, provincia de Santa Elena [11]. El punto de partida al que se refirieron las altitudes que el IGM transportó por las principales carreteras y a casi todas las ciudades del país mediante nivelación geométrica es el punto conocido como BM-3, cuya elevación oficial es 6,2707 m respecto al cero de la regla del nivel medio del mar calculado entre los años de 1988 y 2009 [12].

En cuanto a las observaciones de gravedad, éstas han sido realizadas desde el año 2003 hasta la actualidad. La densificación de las mediciones de gravedad

se realiza considerando una distancia de hasta 5 km para zonas planas y hasta 3 o 4 km en las zonas de montaña. Como se puede evidenciar tanto en la figura 1 como en la figura 2, la distribución de puntos con gravedad observada no es homogénea y esto se debe principalmente a la dificultad de localizar los puntos que forman parte de las líneas de nivelación observadas varios años atrás. La mayor densificación gravimétrica disponible se encuentra a lo largo de las líneas de nivelación que atraviesan la "Ruta del Spondylus", por la costa ecuatoriana, ya que las campañas de nivelación como de gravedad para esta zona fueron hechas simultáneamente. En este estudio se han empleado las densificaciones gravimétricas de todas las campañas realizadas hasta la actualidad.

Los equipos empleados para la observación gravimétrica han sido gravímetros Lacoste & Romberg, modelo G, con números de serie 23, 720 y 835. La incertidumbre considerada por el IGM en las observaciones gravimétricas es de 0.05 mGal.

En función de la nomenclatura manejada por el IGM, los anillos seleccionados para este estudio fueron los siguientes: I, II, III, IV, VIII, IX, X y XII, conformados en total por 23 líneas de nivelación. La longitud máxima existente de dichas líneas de nivelación es de 349,01 km y la mínima de 3,00 km.

El objetivo de haber seleccionado mencionados anillos fue estudiar las altitudes que representan la diversa orografía del país, como la Cordillera de los Andes, regiones interandinas y planicies costeras. La figura 1 indica la geometría de los 8 anillos de nivelación.

Sin embargo, uno de los principales inconvenientes encontrados durante el estudio fue la presencia de varios puntos y nodos que no contaban con gravedad observada. Por este motivo, y como solución ante el problema, los puntos que no contaban con gravedad observada fueron excluidos del análisis, uniendo entre sí los puntos que sí contaban con ella. En virtud de no afectar a la nivelación geométrica, los desniveles entre los puntos que fueron unidos contienen la suma de los desniveles de los puntos sin gravedad conocida. En la figura 2 se puede apreciar el mapa de una nueva geometría de los anillos de nivelación.

Además, la figura 2 pone en evidencia que varias líneas de nivelación fueron completamente descartadas debido a la significativa presencia de puntos sin medidas de gravedad en ellas. Estas líneas se encontraban formando anillos que, para los fines del presente estudio, carecían de significado práctico. Es por esto que se obtuvieron 3 nuevos anillos y 7 líneas de nivelación. La tabla 3 indica la longitud de cada una de ellas. El cálculo de los diferentes tipos de altitudes dentro del presente estudio será realizado únicamente para esta nueva estructura.

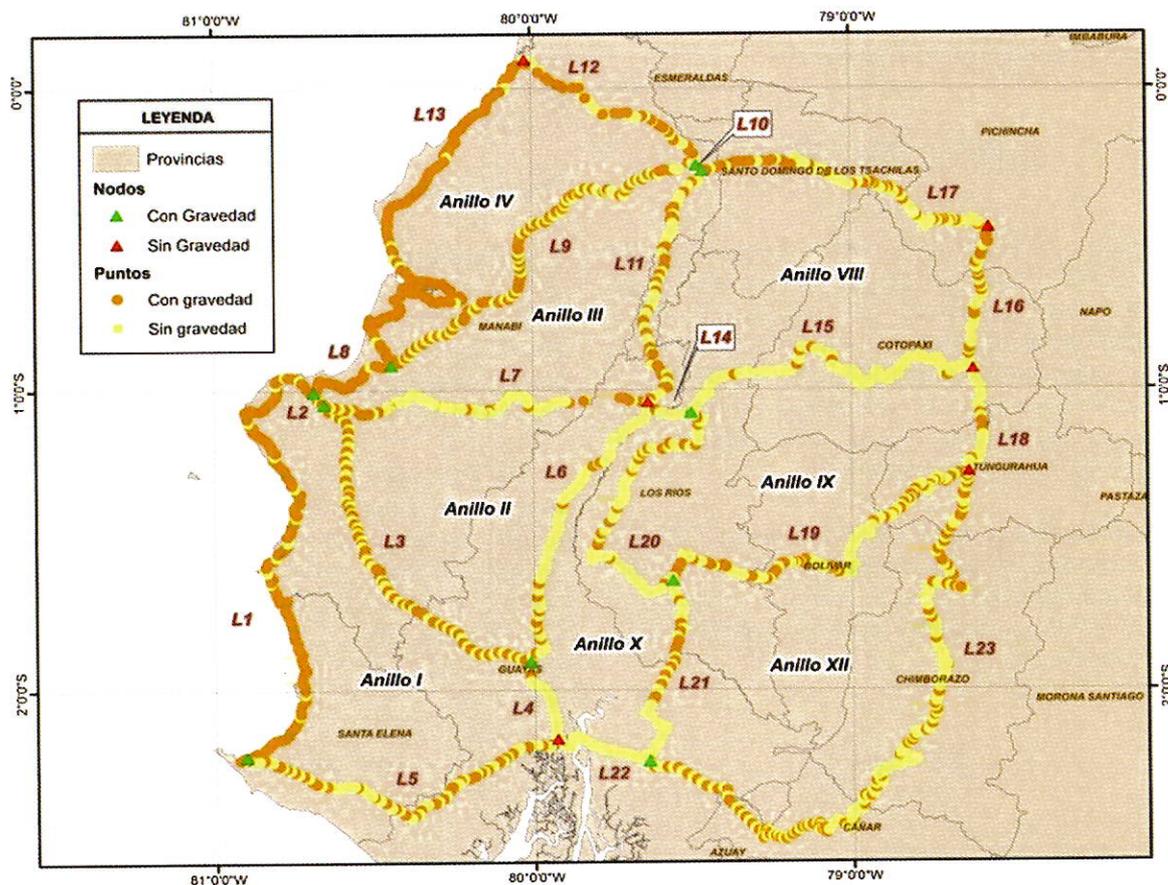


Figura 1. Mapa de anillos, nodos y líneas de nivelación del estudio.

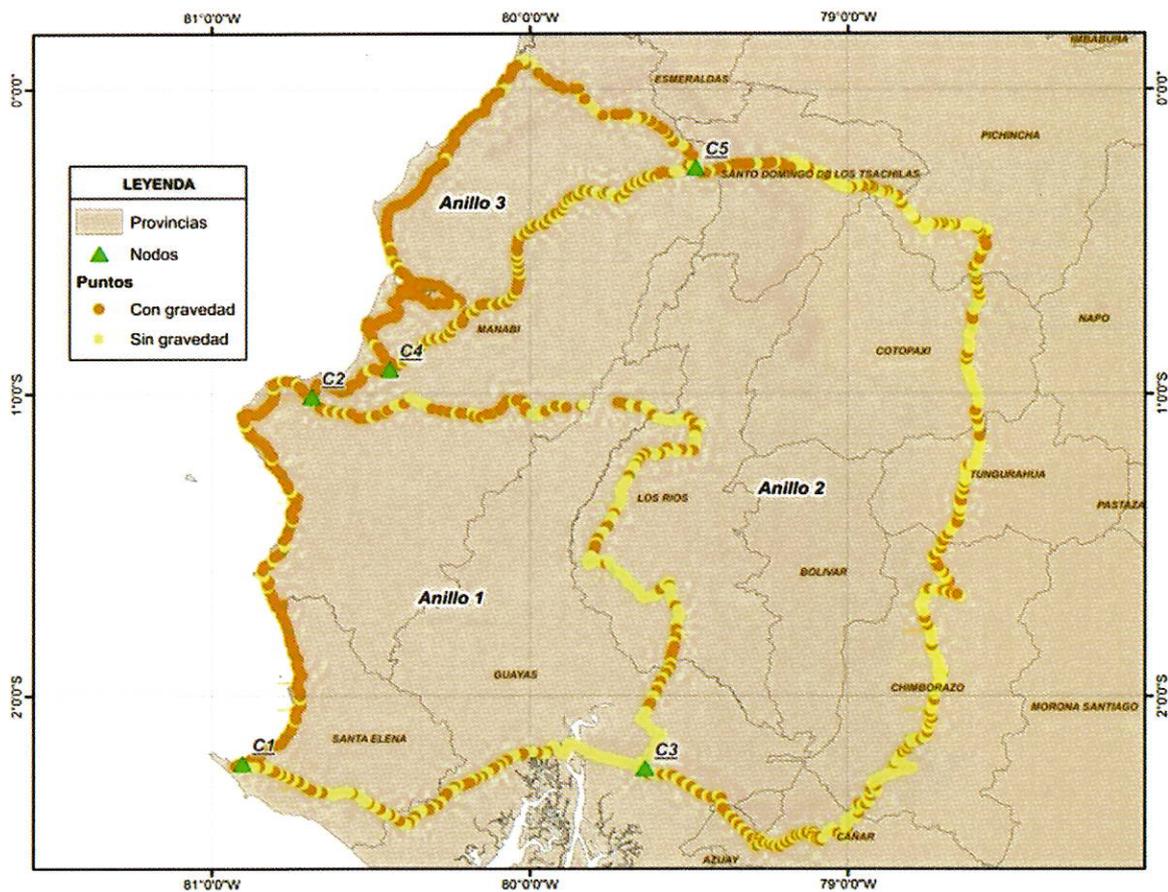


Figura 2. Mapa de los nuevos anillos conformados para el estudio

Las nuevas 7 líneas de nivelación se encuentran unidas por 5 nodos y conformadas por 1234 puntos, de los cuales el 48,30% posee gravedad observada y el 51,70% no cuentan con este dato. Esta última cantidad de puntos sin gravedad fueron aquellos a los que se les unió con la cantidad de puntos restante que sí contaban con datos de gravedad observada.

Partiendo de esta consideración, para el cálculo y ajuste de las altitudes ortométricas de Helmert, normales y dinámicas, se trabajó con toda la información perteneciente a los nuevos anillos. Con esto, el propósito es contar con una primera aproximación para el ajuste de toda la Red de Control Básico Vertical del Ecuador.

Las líneas de nivelación seleccionadas para el estudio han sido observadas desde el año 1990 hasta 2008. Los equipos empleados para la nivelación geométrica han sido niveles geodésicos de precisión (tres Leica/Wild NA-2, dos Leica NA-3003 y un Wild NA-K2) que garantizan el cierre tolerable por el IGM. Los criterios de tolerancia que maneja el IGM se encuentran estipulados en las Especificaciones Técnicas Generales para la Realización de Cartografía Topográfica a Cualquiera Escala¹ y que en el caso de nivelación geométrica se indica que, cuando la línea sea cerrada, el error de cierre no será en ningún caso superior a $4\text{ mm}\sqrt{K}$, siendo K la longitud de la línea nivelada en kilómetros.

Con el fin de conocer si las 7 líneas de nivelación se encuentran dentro de tolerancia o no se comparó entre el error de cierre de cada línea, obtenido a través de la suma de todos los desniveles de ida más los de vuelta, con el valor tolerable calculado mediante la expresión mencionada en el párrafo anterior.

A partir de este criterio se encontró que las líneas L3 y L7 no entraron en la precisión que un proceso de nivelación geométrica de primer orden requiere, pues el valor del error de cierre supera el valor tolerable. La tabla 1 indica los valores de los errores de cierre y tolerables para cada una de las líneas.

Es necesario recalcar que las líneas que no entraron en tolerancia originalmente se encontraban en-

Tabla 1. Datos de entrada para el ajuste de cotas geopotenciales.

Línea	Error de cierre (mm)	Tolerancia (mm)
L1	0,20	59,44
L2	-79,80	80,11
L3	54,20	52,95
L4	57,61	98,35
L5	1,20	52,51
L6	-2,00	24,49
L7	122,10	70,84

¹ Documento disponible en: <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/articulos-tecnicos/normalizacion-tecnica/>

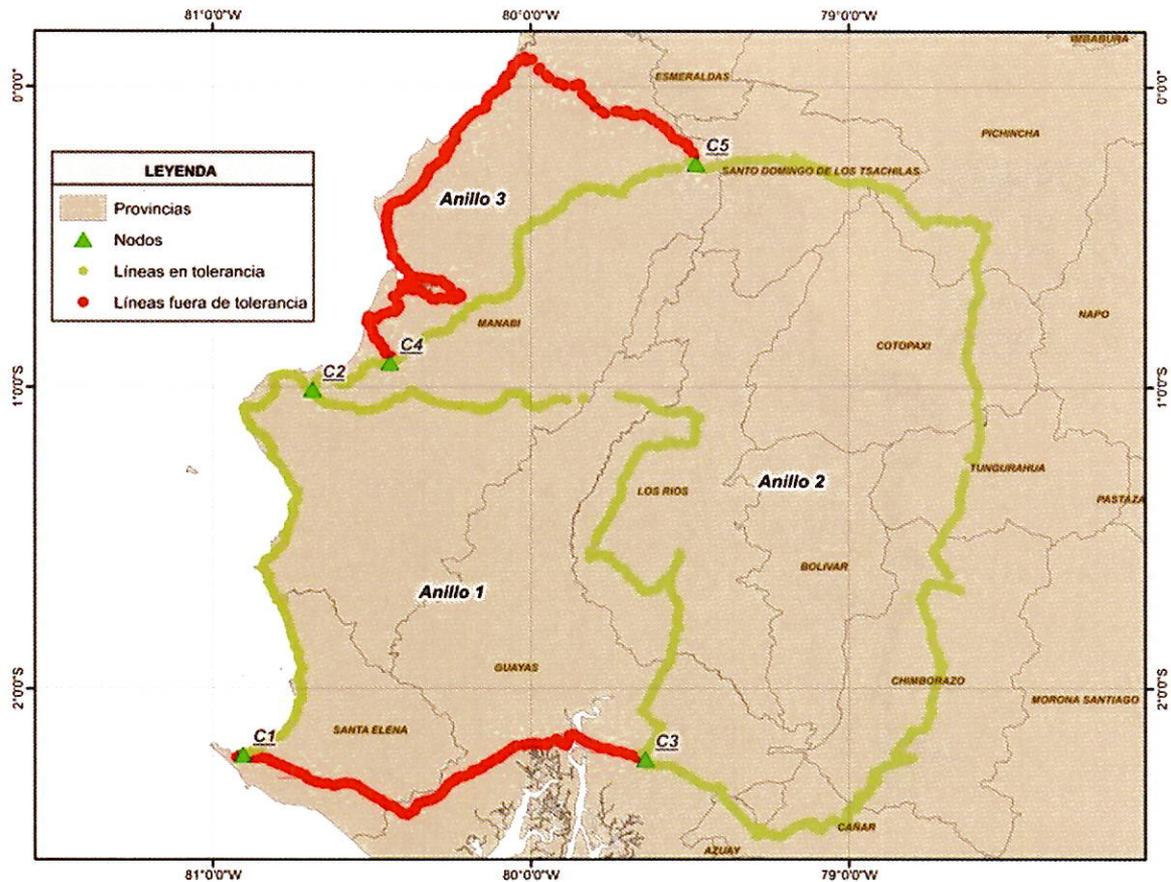


Figura 3. Mapa de líneas de nivelación dentro y fuera de tolerancia.

lazadas por más nodos que, debido a la ausencia de gravedad observada en ellos, estos tuvieron que ser enlazados con puntos que sí cuentan con este dato. La figura 3 indica el mapa con las líneas de nivelación dentro y fuera de tolerancia.

Antes de iniciar con el cálculo de los diferentes tipos de altitudes se realizó un análisis de los cierres a partir de los desniveles observados para las líneas de nivelación de los anillos conformados en estudio, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Cierre de altitudes niveladas de cada anillo.

Anillo	Nodo	Altitud Nivelada de Ida (m)	Altitud Nivelada de Vuelta (m)	Cierre (m)
Anillo 1	C1	6,2707	6,2829	0,0122
Anillo 2	C2	101,3989	101,4167	0,0178
Anillo 3	C4	235,4657	235,4135	0,0522

Para el cálculo de las cotas geopotenciales de todos los puntos y nodos de las líneas de nivelación, al igual que en el cálculo de las altitudes niveladas, es necesario conocer el valor de la cota geopotencial correspondiente al punto de partida. Para ello se parte de la expresión (3) y es necesario introducir el concepto de la gravedad media.

La gravedad media a lo largo de la línea de la plomada entre el geoide y el punto de trabajo puede ser obtenida mediante diversos métodos de reducción. En este caso, se consideró el método de reducción de Poincaré y Prey, lo que da lugar a la obtención de las denominadas altitudes ortométricas de Helmert. La gravedad media por el método de reducción de Poincaré y Prey se determina mediante la expresión

$$\bar{g} = g + 0,0424H^0 \tag{5}$$

donde g es la gravedad medida en la superficie topográfica, H^0 es la altitud ortométrica para la cual puede utilizarse, sin pérdida de precisión apreciable, un valor proveniente de un ajuste previo de la red utilizando los desniveles observados y 0.0424 es un factor que se deriva del proceso propio de la reducción de la gravedad hacia el punto medio entre la superficie topográfica y el geoide. Dicho factor es válido para la densidad normal $2,67 \text{ g/cm}^3$ [9].

Reemplazando (5) en (3) se tiene como resultado la siguiente expresión

$$H^0 = \frac{C}{g + 0,0424H^0} \tag{6}$$

Es importante tomar en cuenta que las unidades de (6) son: u.g.p para la cota geopotencial C , Gales para la gravedad g y kilómetros para altitud ortométrica H^0 . La expresión (6) puede reformularse como una ecuación de segundo grado, como se indica

$$0,0424(H^0)^2 + gH^0 + C = 0 \quad 7)$$

Para el desarrollo del estudio se ha aceptado la hipótesis que considera el geoide y el nivel medio del mar coincidentes en el datum vertical del país, es decir, la altitud nivelada y altitud ortométrica, hipotéticamente hablando, en este punto son las mismas. Es por esto que a partir de la ecuación (7) se puede despejar el valor de C , pues la cota geopotencial y la altitud ortométrica perteneciente al punto de partida BM-3 son valores conocidos. Para este estudio, el valor de C fue de 6,1334 kgal*m.

A continuación se realizó el cálculo de las diferencias de potencial entre los puntos observados a lo largo del itinerario de nivelación a través de

$$\Delta C_A^B = \frac{g_A + g_B}{2} \Delta n_A^B \quad 8)$$

donde g_A y g_B representan el valor de gravedad medida en los puntos A y B sobre la superficie topográfica, Δn_A^B es el desnivel observado y ΔC_A^B es la diferencia de potencial de A hacia B . Con el dato de C conocido para un punto origen se pueden calcular los valores de las cotas geopotenciales para cada punto de las líneas de nivelación mediante la expresión

$$C_B = \frac{\Delta C_A^B - \Delta C_B^A}{2} + C_A \quad 9)$$

Para el ajuste de las cotas geopotenciales se aplicó el Método de Mínimos Cuadrados (MMC), implementado como un script para el software libre GNU Octave 4.0.0².

El criterio del MMC se basa en aceptar, como mejor estimación de un grupo de incógnitas, el valor que hace mínimo a la suma de los cuadrados de los residuos, que son la diferencia entre los valores a priori desconocidos y las observaciones realizadas [13], que en lenguaje matricial se representa por la expresión

$$V^T P V = \min \quad 10)$$

donde $V=AX-L$ representa la matriz de residuos y P es una matriz cuadrada de pesos de las observaciones.

El MMC parte del planteamiento de un sistema de ecuaciones lineales representadas por la expresión:

$$AX = L \quad 11)$$

donde X es el vector de los parámetros desconocidos, L es el vector de las observaciones, que en este caso contendrá los incrementos de cotas geopotenciales entre nodos, y A es la matriz que los relaciona, denominada como matriz de diseño y que se construye a partir de la ecuación fundamental

$$C_B = C_A + \Delta C_A^B \quad 12)$$

La solución del problema expresa mediante

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad 13)$$

Para la construcción de la matriz de pesos se utilizó el criterio de observaciones independientes, por lo que la correspondiente matriz es diagonal. Ésta se construyó en base a la desviación típica teóricamente estimada para cada línea según el criterio de precisión a priori de $4 \text{ mm}/\sqrt{K}$. Por lo tanto:

$$P = \sigma_o^2 \sum_{i,j}^{-1} \quad 14)$$

donde σ^2 representa la varianza de referencia del observable de peso unidad, considerada con un valor 1, y $\sum_{i,j}^{-1}$ es la matriz de varianzas-covarianzas de las observaciones, cuadrada y con el valor de las varianzas predichas de las líneas observadas en su diagonal. Aunque como observaciones se emplea los incrementos de cotas geopotenciales, la matriz de pesos puede ser construida a partir de las varianzas teóricas para los desniveles, ya que como los valores son muy pequeños su transformación a u.g.p apenas se verá afectada.

Debido a que a simple vista no existe un criterio que permita discriminar si los valores obtenidos después del ajuste resultan mejores o más confiables que los obtenidos antes del ajuste, se aplicó una prueba estadística Chi-cuadrado. Los resultados del ajuste fueron aceptados debido a que pasaron el test global del modelo.

Por último, se estimaron las precisiones de la solución obtenida mediante la matriz de varianzas-covarianzas a posteriori expresada por

$$\sum X = \frac{V^T P V}{m-n} (A^T P A)^{-1} \quad 15)$$

² Información del software disponible en: <http://www.gnu.org/software/octave/>

Considerando que se cuenta con un total de 5 nodos pero que el primero de ellos (C1 o BM-3) pertenece al punto de partida de los procesos de nivelación y cuya cota geopotencial ya está definida, son apenas 4 nodos (C2, C3, C4 y C5) los que fueron considerados como incógnitas para el ajuste, ya que son estos puntos los únicos que tienen observaciones redundantes al confluir en ellos más de una línea de nivelación. La tabla 3 indica los datos de entrada para el ajuste de cotas geopotenciales.

Tabla 3. Datos de entrada para el ajuste de cotas geopotenciales

Línea	Punto Partida	Punto Llegada	Longitud (km)	Diferencia de Cota Geopotencial (u.g.p)
L1	C1	C2	220,825	93,0413
L2	C2	C3	401,108	-85,8771
L3	C3	C1	175,200	-7,1426
L4	C3	C4	604,599	216,9456
L5	C4	C5	172,320	-213,1221
L6	C5	C2	37,470	82,0269
L7	C5	C4	313,630	213,0848

Las cotas geopotenciales ajustadas para los 4 nodos, así como sus desviaciones típicas pueden verse en la tabla 4.

Tabla 4. Cotas geopotenciales ajustadas y sin ajustar

Nodo	Cota Geopotencial Ajustada (u.g.p)	Desviación Típica (u.g.p.)
C2	99,1658	0,014106
C3	13,2829	0,013204
C4	230,2440	0,017948
C5	17,1379	0,015361

Una vez realizado el ajuste de las cotas geopotenciales de los nodos de la red se pueden calcular las cotas geopotenciales del resto de los puntos de las líneas de nivelación mediante la expresión (9) después de corregir los incrementos de cota geopotencial entre los puntos de las líneas.

El ajuste puede llevarse a cabo también introduciendo como incógnitas todos los puntos internos a las líneas de nivelación, de tal modo que las correcciones a sus cotas geopotenciales se harían automáticamente en la resolución del sistema, aunque los incrementos de cota geopotencial entre los puntos nodales C2, C3, C4 y C4 no cambiaría con respecto a la metodología utilizada en este trabajo. Como en este estudio el objetivo es el análisis de la influencia de la observación de

la gravedad en el cierre de los anillos, se ha realizado el ajuste únicamente con los puntos nodales como incógnitas.

Hasta este punto, lo único que resta por conocer para realizar el cálculo de los tres tipos de altitudes físicas es la gravedad media real, la gravedad normal y la gravedad normal a los 45° de latitud.

En cuanto a la gravedad media real, ésta puede ser calculada a través de la ecuación (5). Sin embargo, a partir de la ecuación (7), es posible conocer directamente la altitud ortométrica de Helmert mediante:

$$H^o = \frac{-g + \sqrt{g^2 - 4 \times (0,0424) \times (-C)}}{2 \times (0,0424)} \quad 16)$$

La ecuación (16) requiere únicamente de los valores de gravedad observada y de la cota geopotencial de cada punto. Sin embargo, al ser una ecuación de segundo grado se deberá analizar cuál de sus dos soluciones se debe tomar.

Para el cálculo de la gravedad normal a los 45° de latitud, necesaria para la determinación de las altitudes dinámicas (ecuación (2)), se empleó la fórmula internacional de la gravedad para el elipsoide GRS80 [12]:

$$\gamma = 9,7803267715 \text{ ms}^{-2} (1 + 0,0052790414 \sin^2 \varphi + 0,0000232718 \sin^4 \varphi + 0,0000001262 \sin^6 \varphi + 0,0000000007 \sin^8 \varphi) \quad 17)$$

Las altitudes normales pueden calcularse mediante la expresión

$$H^N = \frac{c}{\gamma} \left[1 + (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) \frac{c}{a\gamma} + \left(\frac{c}{a\gamma}\right)^2 \right] \quad 18)$$

que es una aproximación a la ecuación (4) con suficiente precisión para los propósitos de este trabajo.

Análisis de resultados

El primer análisis ha realizarse se encuentra enfocado en identificar las diferencias existentes entre los valores de altitudes niveladas respecto a las altitudes físicas ajustadas. Para ello, se realizó también un ajuste de altitudes niveladas empleando nuevamente el MMC. Por lo indicado en la sección II, subsección B2, las altitudes dinámicas no serán consideradas en ninguno de los siguientes análisis.

La tabla 5 indica las altitudes ajustadas para cada uno de los 4 nodos considerados en este estudio.

Tabla 5. Altitudes ajustadas

Nodo	Altitud Nivelada Ajustada (m)	Altitud Ortométrica Ajustada (m)	Altitud Normal Ajustada (m)	Altitud Dinámica Ajustada (m)
C2	101,3990	101,3874	101,3946	101,1256
C3	13,5700	13,5809	13,5812	13,5454
C4	235,4342	235,4290	235,4241	234,7943
C5	17,5340	17,5227	17,5229	17,4766

De esta manera, se identificó que tanto la máxima como la mínima diferencia existentes le corresponden al nodo C2. La máxima diferencia es de 1,16 cm entre su altitud nivelada y su altitud ortométrica mientras que la mínima posee un valor de 0,44 cm, entre su altitud nivelada y su altitud normal.

Además, a partir del cálculo de los desniveles sin ajustar, tanto geométricos como físicos, un aspecto muy importante es el análisis de los cierres de los anillos de nivelación con el fin de conocer el tipo de altitud que permite un cierre más pequeño. Es por esto que la tabla 6 indica los cierres de las altitudes geométricas y altitudes físicas de cada anillo de nivelación.

Tabla 6. Cierre de altitudes geométricas y físicas

Anillo	Cierre Altitud Nivelada (m)	Cierre Altitud Ortométrica (m)	Cierre Altitud Normal (m)	Cierre Altitud Dinámica (m)
Anillo 1	0,0122	0,0221	0,0221	0,0220
Anillo 2	0,0178	0,0272	0,0272	0,0271
Anillo 3	0,0522	0,0381	0,0381	0,0380

Como se puede apreciar en la tabla 6, el cierre obtenido a partir del cálculo de las altitudes de tipo físico para el anillo 3, es menor en 1,41 cm al cierre obtenido mediante el cálculo de las altitudes niveladas. Mientras que el cierre obtenido a partir de las altitudes físicas para el anillo 1 y anillo 2, supera en aproximadamente 1 cm y 0,94 cm, respectivamente, al cierre obtenido mediante el cálculo de altitudes niveladas.

Una de las razones ante este comportamiento puede deberse a la densificación gravimétrica que los 3 anillos posee. Existe una mejor densificación gravimétrica para el anillo 3 en comparación con la perteneciente al anillo 1 y anillo 2. Este es el hecho que puede estar influenciando en que el anillo 3 cuente con un cierre más pequeño a partir del cálculo de altitudes de tipo físico, respecto al obtenido a partir del cálculo de altitudes niveladas, validando así el modelo teórico de influencia del campo de la gravedad en nivelación.

La mayoría de puntos pertenecientes al anillo 3, al contar con observaciones de gravedad, formaron

parte del cálculo de las altitudes de carácter físico. Por esto, las perturbaciones generadas por el campo de gravedad terrestre sobre este anillo, logran ser corregidas para una mayor cantidad de puntos que los que conforman las líneas del anillo 1 y anillo 2.

También se consideró necesario analizar el comportamiento de las altitudes físicas en los puntos más altos de la zona de estudio, ya que en base a los fundamentos teóricos, en las zonas montañosas es en donde existe variaciones de hasta un metro entre del geoide y el cuasi-geoide, superficies sobre las cuales se refieren las altitudes ortométricas y normales, respectivamente.

A continuación, la tabla 7 indica los puntos que poseen las tres mayores altitudes niveladas y sus correspondientes altitudes ortométricas y normales ajustadas.

Tabla 7. Altitudes niveladas, ortométricas y normales de los puntos más altos.

Punto	Altitud Nivelada (m)	Altitud Ortométrica Ajustada (m)	Altitud Normal Ajustada (m)
C302	3495,3206	3496,3301	3495,4529
C303	3602,4039	3603,4583	3602,5532
C304	3523,5844	3524,6017	3523,7218

Mientras que la tabla 8 posee las diferencias entre los distintos tipos de altitudes, observándose que la mayor diferencia se encuentra entre la altitud nivelada y altitud ortométrica, con 1,05 m para el punto más alto, C303. Mientras que la menor diferencia registrada se la obtiene entre la altitud nivelada y la altitud normal, con 13,23 cm correspondiente al punto más bajo de los tres, C302.

Tabla 8. Diferencia de altitudes de puntos más altos

Punto	Diferencia Altitud Nivelada Ortométrica (m)	Diferencia Altitud Nivelada Normal (m)	Diferencia Altitud Ortométrica Normal (m)
C302	-1,0095	-0,1323	0,8772
C303	-1,0545	-0,1494	0,9051
C304	-1,0173	-0,1374	0,8799

Conclusiones y recomendaciones

Con el cálculo de las altitudes físicas, el cierre de dos de los tres anillos de nivelación no fue menor que el cierre obtenido mediante el cálculo de las altitudes niveladas, lo cual puede deberse a que en el estudio se logró realizar el cálculo de las altitudes físicas con apenas el 48,30% de puntos, porcentaje que representa la cantidad de puntos que cuentan con observaciones

de gravedad. Esto hace que haya muchos tramos de nivelación demasiado largos, propiciando que la ecuación (8) no sea todo lo exacta que se esperaría. La longitud entre puntos con gravedad observada cobra una importancia capital si la orografía del terreno es muy abrupta, como es el caso de gran parte de los anillos 1 y 2, que son los que peor resultado muestran.

En general, la estimación de la longitud máxima de los tramos con gravedad observada no es una tarea fácil, variando ampliamente el rango, desde 10 km para terrenos llanos hasta 1 km para orografías muy complicadas [14].

El único anillo que posee un mejor cierre, obtenido a partir del cálculo de altitudes niveladas, que el obtenido con altitudes físicas es el anillo que cuenta con una mejor densificación gravimétrica, permitiendo que exista mayor cantidad de datos y lograr corregir los efectos del campo de gravedad de los puntos que forman dicho anillo.

Las principales recomendaciones que se pueden brindar a partir del desarrollo del estudio es que, además de un cuidadoso estudio de los cierres y tolerancias de las líneas observadas, por si fuese necesario reobservar algún tramo, se generen y planifiquen nuevas campañas en las que se realicen observaciones de gravedad sobre las placas de nivelación. Como se pudo observar en los resultados, el cálculo de las alturas físicas es aún un tema que posee muchos inconvenientes, y mucho más al ser el Ecuador un país en el que su topografía es realmente complicada. Por esto, una correcta densificación gravimétrica, partiendo de criterios técnicos, es completamente necesaria para que en un futuro se logre contar con resultados más cercanos a la realidad.

Agradecimientos

Agradecimiento al Instituto Geográfico Militar, debido al apoyo prestado a la investigación, tanto en información como en ayuda por parte de los técnicos del Departamento de Geodesia, especialmente al Ing. Fredy Flores y Geomensor Freddy Rodríguez. Y un muy profundo agradecimiento también a la Dra. Alejandra Staller y al Dr. José Luis García Pallero, por el gran aporte académico brindado durante la estancia de investigación en la ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid.

Referencias

- [1] L. Sánchez, Determinación de las Altitudes Físicas en Colombia. Dresden: Universidad Técnica de Dresden, 2002.
- [2] H. Drewes, L. Sánchez, D. Blitzkow y S. Freitas, "Scientific Foundations of the SIRGAS Vertical Reference System", Springer, IAG Symposia,

vol. 124, pp. 297-301, Febrero 2002.

- [3] J.L. Valbuena, M.D. Vara, M.L. Soriano, G. Rodríguez y M.J. Sevilla, "Instrumentación y Metodología empleadas en las Técnicas Altimétricas Clásicas", en Topografía y Cartografía, vol. 13, Madrid: Universidad Complutense, 1996, pp.6-20.
- [4] C. Gemael. "Introdução à Geodésia Física", UFPR. Curitiba, 1999.
- [5] T.J. Blachut, A. Chrzanowski y J.H. Saastamoinen, "Cartografía y Levantamientos Urbanos", Springer, México, 1979.
- [6] G. Seeber, "Satellite Geodesy", Hannover: Universidad de Hannover, 2da. Edición, 2003.
- [7] P.S. Zakatov. "Curso de Geodesia Superior", Rubiños 1860, Traducido por J.A. Rico. Madrid, Junio 1997.
- [8] W. Torge, "Geodesy", Hannover: Universidad de Hannover, 2da. Edición, 2001.
- [9] N. Yilmaz, "Comparison of different height systems", Taylor and Francis, Geo-spatial Information Science, vol. 11, pp. 209-214, Septiembre 2008.
- [10] W.A. Heiskanen y H. Moritz, "Geodesia Física", Instituto Geográfico Nacional. Madrid, 1985.
- [11] C.D. Ghilani, "Adjustment Computations. Spatial Data Analysis", Wiley, 5ª edición. 2010.
- [12] H. Moritz, "Geodetic Reference System 1980", Bulletin Géodésique, vol. 54, núm. 3, pp. 395 a 405. 1980.
- [13] C. Gemael. "Introducción al Ajuste de Observaciones", UFPR. Curitiba, 1994.
- [14] W. Torge. "Gravimetry", de Gruyter. Berlín, 1989.

ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS CORTICALES DE ESTRUCTURAS A PARTIR DE ONDULACIONES ISOSTÁTICAS Y MODELOS GEOPOTENCIALES

Infante, C¹; Tocho, C^{2,3}; Del Cogliano, D² & Galván, L¹

¹Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías • Universidad Nacional de Santiago del Estero • Santiago del Estero

²Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas • Universidad Nacional de La Plata • La Plata

³Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

Email: cinfante@unse.edu.ar • Email: claudia.nfnt@gmail.com

Resumen

Las observaciones satelitales proporcionan series de datos continuos y homogéneos que permiten evaluar los cambios en la distribución de masas que se producen en el sistema Tierra, modificando su campo de gravedad, desde una perspectiva global. En los últimos años estas variaciones han sido monitoreadas por misiones satelitales gravimétricas (CHAMP, GRACE, y GOCE). Esto ha propiciado el desarrollo de una nueva generación de modelos geopotenciales con soluciones en términos de armónicos esféricos de alto grado y orden, con errores de comisión bajos, lo que se traduce en mayor resolución espacial y mejor precisión. En este trabajo se ha utilizado la información de las ondulaciones del geoide, representadas a partir de modelos geopotenciales modernos, para analizar las características corticales de las estructuras ubicadas en una región central de Argentina. Las ondulaciones del geoide son convenientemente filtradas para poner en evidencia la estructura, a partir de la ondulación residual. Si se asume que la estructura geológica se encuentra en equilibrio isostático, la ondulación residual puede ser asimilada y comparada con la ondulación isostática generada a partir de una corteza isostáticamente compensada. Los desvíos entre la ondulación isostática y el geoide residual, muestran el eventual apartamiento de la estructura analizada respecto del modelo isostático adoptado, una vez eliminada la componente isostática de la ondulación residual. El geoide residual fue derivado de los modelos geopotenciales globales EGM2008 (Pavlis, et al., 2008) y EIGEN 6C4 (Förste, et al., 2014). Para el cálculo, los parámetros de la corteza fueron extraídos de modelos globales GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications) (Sampietro, et al., 2013) y CRUST 1.0 (Laske, et al., 2013). La estadística de los resultados arrojan valores de desvíos entre geoide residual y el geoide isostático que son consistentes tanto cuando se usan los parámetros de GEMMA y CRUST 1.0. La utilización de modelos geopotenciales y modelos de corteza cada vez más precisos, permite proyectar estudios de fenómenos geofísicos apoyados en la infraestructura de datos SIRGAS.

Palabras Claves: geoide isostático – modelos geopotenciales – modelos de corteza

Abstract

There are many factors that degrade GPS- signal tracking since its broadcast from satellite to receiver. Generally, in order to minimize the signal degradation, and get the best accuracy upon a point, relative positioning methods are common. Using absolute positioning, uncertainty is into meter level accuracy, but nowadays is possible to enhance it with PPP (Precise Point Positioning) method. At present PPP is able to model factors that affect accuracy such as ionosphere and troposphere, including orbits and clocks correction among other. This project is aimed to analyze the differences of Cartesian coordinates (X, Y, Z) obtained from Static-PPP method using RTKlib v2.4.2 open source software and official weekly coordinates from SIRGAS solution, to establish a criterion towards standalone positioning. For that, it was used RINEX files from permanent stations belonging REGME included in SIRGAS-CON network, samplings of tracking were 1 and 30 seconds. Processing was carried out with different intervals since 30 seconds until 24 hours, both morning and afternoon. It was applied ionospheric model "Ion Free LC"; tropospheric model "Estimate ZTD" and ambiguity resolution "Fix and Hold". Also, the processing was performed with precise, rapid and ultra-rapid ephemerides released by IGS. Through comparison with weekly coordinates from SIRGAS solution, it was determined that, coordinates calculated from PPP method depend directly on time and parts of the day. Results denoted that to achieve errors in a point less than 1m, 50cm, 30cm and 20cm using ultra-rapids ephemerides it is necessary a minimum tracking of 4, 10, 15 and 35 minutes respectively, while using rapids or finals ephemerides, it is required 2, 7, 10 and 20 minutes respectively. Moreover, it was denoted, there is no significant differences between processing with precise and rapids ephemerides, which does not happen with ultra-rapid ephemeris. From outcomes, it can be concluded that, the methodology handled with PPP solution can be used for certain positioning works that require accuracies in decimeters levels, making it in an useful, accessible and low-cost tool for geo-referencing and surveying.

Keywords: Static PPP, RTKLIB, SIRGAS, Positioning, IGS

Introducción

Las observaciones satelitales proporcionan series de datos continuos y homogéneos que permiten evaluar los cambios en la distribución de masas que se producen en el sistema Tierra, modificando su campo de gravedad, desde una perspectiva global. En los últimos años estas variaciones han sido monitoreadas por misiones satelitales gravimétricas tales como CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), y GOCE (*Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer*). Estas misiones satelitales gravimétricas han propiciado el desarrollo de una nueva generación de modelos geopotenciales con soluciones en términos de armónicos esféricos de alto grado y orden, y errores de comisión bajos. En consecuencia, se disponen de modelos geopotenciales de mayor resolución espacial y mejor precisión.

Los modelos geopotenciales brindan información del campo gravitacional terrestre global y pueden representarse como una descomposición espectral en longitudes de onda que permite analizar anomalías de masa a diferentes profundidades. La presencia de masas anómalas perturba y ondula la superficie equipotencial del geode. Es posible detectar estructuras geológicas en la corteza mediante el filtrado de la ondulación del geode, eliminando la componente de larga longitud de onda. Las características corticales de estructuras geológicas en equilibrio isostático pueden ser inferidas a partir de la interpretación de desviaciones del geode respecto del elipsoide de referencia (Haxby y Turcotte, 1978). La información contenida en las ondulaciones de un geode residual representadas a partir de modelos geopotenciales modernos, se utilizan para analizar las características corticales de estructuras.

Asimismo, se disponen de modelos globales de corteza tales como GEMMA (*GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications*) (Sampietro, et al., 2013) y CRUST 1.0 (Laske, et al., 2013) que proporcionan parámetros de corteza globales que facilitan evaluaciones del estado de compensación de estructuras geológicas cuando no se disponen de datos locales.

Ondulación del geode isostático

De acuerdo al modelo de compensación isostático de Airy una estructura de referencia, con una corteza normal de espesor t , (Figura 1), densidad de la corteza ρ_c y densidad del manto ρ_m ; una estructura de altura H será compensada por la presencia de raíces de espesor r , tal que:

$$r = \frac{\rho_c H}{\rho_m - \rho_c} \tag{1}$$

Se puede demostrar que el potencial perturbador isostático T_{isost} producido por la masatopográfica de una estructura de altura H y raíz r será:

$$T_{isost} = \pi G \rho_c H \left[2t + \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_c} H \right] \tag{2}$$

Donde G es la constante de Gravitación Universal con un valor de $6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ seg}^{-2}$, ρ_c y ρ_m son las densidades de la corteza y manto superior respectivamente, t el espesor de la corteza de referencia y H la altura de la estructura.

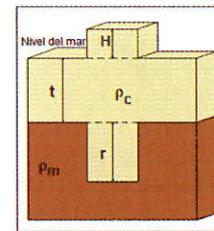


Figura 1. Modelo isostático de Airy.

Aplicando la fórmula de Bruns(Heiskanen y Moritz, 1967), que relaciona la ondulación del geode N con el potencial perturbador T , obtenemos:

$$N_{isost} = \frac{\pi G \rho_c H}{\gamma} \left[2t + \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_c} H \right] \tag{3}$$

Siendo g la gravedad normal en el punto de cálculo. La ecuación (3) resuelve la ondulación isostática N_{isost} para una estructura compensada (Haxby y Turcotte, 1978; Fowler, 2005) en términos de una función que depende únicamente de la altura de la estructura en estudio, establecidas las densidades y espesor cortical normal que serán asumidos como valores fijos.

Análisis isostático de estructuras

Para inferir las características corticales de la estructura geológica que se asume en equilibrio isostático, se compara el geode observado y debidamente filtrado con el correspondiente a un modelo cortical perfectamente compensado. Previamente, es necesario filtrar la ondulación del geode observado y retener las señales vinculadas a la estructura estudiada. Este geode residual se compara con el obtenido a partir de un modelo isostáticamente balanceado. Las diferencias entre ambos representarán el grado de ajuste del modelo de referencia adoptado con el real.

La ondulación del geode observada N_{obs} , se toma de los modelos geopotenciales globales, que puede escribirse como la suma de una componente regional

N_{reg} que refleja el comportamiento predominante de la zona y otra residual N_{res} ligada a las particularidades de la estructura analizada. N_{obs} se estima a través del modelo geopotencial al que designamos N_{mod} y puede expresarse como (Del Cogliano, 2006):

$$N_{mod} = N_{reg} + N_{res} + v_n \quad 4)$$

donde v_n representa los errores del modelo geopotencial.

$$N_{res} = N_{mod} - N_{reg} - v_n \quad 5)$$

Si estas particularidades son atribuidas a las discrepancias entre la corteza real y la corteza regularizada, es posible asimilar la ondulación residual a la isostática, determinada mediante la ecuación (3) con parámetros de corteza del modelo de referencia adoptado. En una situación de equilibrio isostático se verifica que:

$$v_1 = N_{res} + v_n - N_{isost} \quad 6)$$

donde n_i representa los desvíos del modelo isostático y los errores en la evaluación del mismo. Una vez eliminada la componente isostática de la ondulación residual, de acuerdo a (6), los valores v_1 muestran el eventual apartamiento de la estructura analizada del modelo isostático adoptado (Del Cogliano, 2006).

Área de trabajo

El área de trabajo comprende las Sierras de la Ventana ubicada en la zona Suroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. La estructura topográfica estudiada se extiende sobre unos 200 km con un an-

cho que no supera los 50 km, con un desarrollo longitudinal con eje imaginario de dirección Noroeste a Sureste. El análisis se realizó sobre un perfil que secciona la estructura con una longitud de 110 km y un acimut de 150° (Figura 2).

Descripción de datos utilizados

Para el análisis, se tomó como geoida observado los obtenidos de los modelos geopotenciales globales EGM2008 (Pavlis, et al., 2008) y EIGEN 6C4 (Förste, et al., 2014). Para el cálculo de la ondulación del geoida isostático, se tomaron como parámetros de referencia (densidades y espesor de corteza) los correspondientes a los modelos GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications) (Sampietro, et al., 2013) y CRUST 1.0 (Laske, et al., 2013). En ambos casos se usó el modelo de elevaciones DTM2006 (Pavlis et al; 2006).

Modelo EGM2008

EGM2008 es un modelo del potencial gravitacional terrestre en términos de armónicos esféricos (Pavlis et al., 2008) de la NGA (National Geospatial Intelligence Agency) desarrollado por una combinación de datos de la misión GRACE (Tapley et al., 2005), los cuales contribuyen al modelo hasta el grado y orden 180 a través de la solución ITG GRACE03S (Mayer-Gür, 2008), con información contenida en una base de datos global compilada por la NGA de anomalías de gravedad de aire libre con una resolución de 5 minutos de arco. Esta base de datos contiene datos de fuentes terrestres, aerotransportadas y derivadas de la altimetría satelital. Es un modelo completo de grado y orden 2159, asimismo contiene coeficientes de armónicos esféricos adicionales que se extienden hasta grado 2190 y orden 2159, con una resolución espacial de 5 minutos de arco (~9 km de resolución espacial).

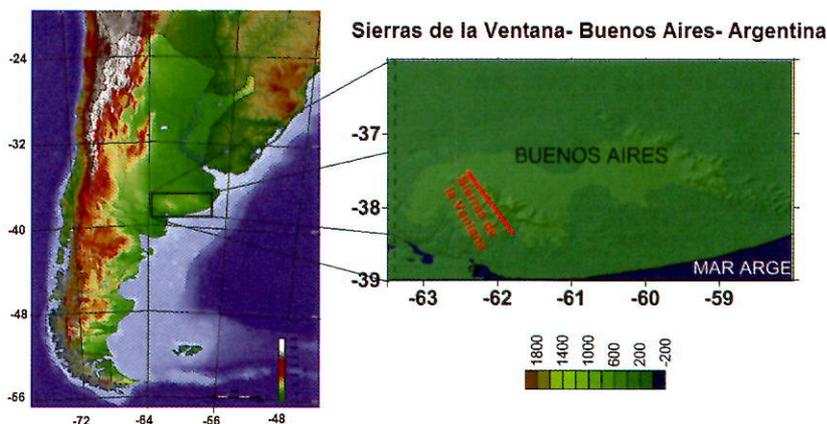


Figura 2. Ubicación del perfil de la estructura de Tandil sobre mapa topográfico. Las unidades de la escala de color están en metros.

Modelo EIGEN-6C4

EIGEN-6C4 (Förste, et al., 2014) es un modelo global combinado del campo de gravedad estático hasta grado y orden 2190. Ha sido elaborado conjuntamente por GFZ Potsdam y GRGS Toulouse. La combinación de los diferentes conjuntos de datos de satélites y de superficie ha sido realizada por una combinación de banda limitada de ecuaciones normales (grado máximo a 370), que se genera a partir de ecuaciones de observación para los coeficientes armónicos esféricos. La solución resultante hasta grado y orden 370 se ha extendido hasta grado y orden 2190 por una solución de bloque diagonal usando datos grillados de anomalías de la gravedad global DTU10.

Modelo GEMMA

El proyecto GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications), financiado por la Agencia Espacial Europea, tiene como objetivo principal estimar el límite entre la corteza terrestre y el manto (la llamada discontinuidad de Mohorovicic o Moho) a partir de datos de GOCE, proponiendo una solución basada en un modelo simple de dos capas en la aproximación esférica. Este modelo tiene una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ y está compuesto de siete capas que describen la geometría y la densidad de los océanos, las capas de hielo, los sedimentos superiores, medios y bajos, la corteza cristalina y el manto superior (Sampietro et al., 2013).

Modelo CRUST 1.0

CRUST1.0 es una versión actualizada del modelo CRUST 2.0 (Laske, et al., 2013, Basin et al., 2000), con la mejora en la resolución de $2^\circ \times 2^\circ$ a $1^\circ \times 1^\circ$. Se basa en ETOPO1 para topografía y batimetría, los sedimentos se toman de un modelo de $1^\circ \times 1^\circ$ (Laske et al., 1997), mientras que el grosor de la corteza es una recopilación de experimentos con fuentes activas, funciones receptoras y mapas Moho ya publicados. La principal diferencia entre CRUST 2.0 y CRUST 1.0 son en el número de tipos de corteza que disminuye de 360 a 35, en el cambio del modelo de densidad del manto superior y en la introducción de crestas oceánicas medias.

Modelo Digital de Elevación DTM2006

DTM2006.0 (Pavlis et al; 2006) es el modelo digital de elevación que usa el calculador del ICGEM (International Center for Global EarthModels) para obtener las alturas del geoidea partir de las anomalías de altura y las anomalías de Bouguer en términos de armónicos esféricos. El calculador del ICGEM ofrece la posibilidad de obtener de manera separada la topografía con este modelo. La resolución del mismo es la del EGM2008 (Pavlis et al., 2008), es decir 5 minutos de arco. Las coordenadas están expresadas en el sistema WGS84 y las alturas están referidas al EGM2008.

Resultados y discusión

La estructura de las Sierras de la Ventana se ubica en un sector de corteza extendida, de acuerdo al modelo GEMMA. La ondulación del geoide isostático en la estructura, se calculó usando parámetros corticales determinados a partir de los modelos globales GEMMA ($\rho_c = 2.82 \text{ g/cm}^3$, $\rho_m = 3.37 \text{ g/cm}^3$, $t = 34 \text{ km}$) y CRUST 1.0 ($t = 35 \text{ km}$). La altura se tomó del modelo digital de elevación DTM2006 (Tabla 1).

El geoide residual N_{res} se obtuvo de la ondulación del geoide de los modelos geopotenciales completos EGM2008 y EIGEN-6C4 (N_{mod}) al que se le resta la ondulación del geoide regional N_{reg} resultante del truncamiento de sus desarrollos en armónicos esféricos hasta el grado 100 (longitud de onda asociada $\approx 400 \text{ km}$ y resolución 200 km) para retener las particularidades de la estructura. Al restarle a la señal completa la contribución de la larga longitud de onda, solo retenemos la información relativa a las sierras en estudio. La Figura 3 (izquierda) muestra el geoide residual del modelo EGM2008 que pone en evidencia la estructura de la Ventana. La distribución espacial de las curvas del geoide residual del modelo EIGEN 6C4 es consistente con el modelo EGM2008.

El geoide isostático se determinó usando parámetros corticales obtenidos de los modelos GEMMA y CRUST. Las curvas del geoide isostático calculado sobre el perfil se muestran en la Figura 3 (derecha). La ondulación isostática muestra el efecto de las masas topográficas y decompensación, por lo que refleja la topografía de la sierra.

Tabla 1. Resumen estadístico de la ondulación geoide isostático.

	Nisost-GEMMA	Nisost-CRUST 1.0
Máximo [m]	2.62	2.69
Mínimo [m]	0.95	0.97
Promedio [m]	2.02	2.08
Desv. estándar [m]	± 0.51	± 0.52

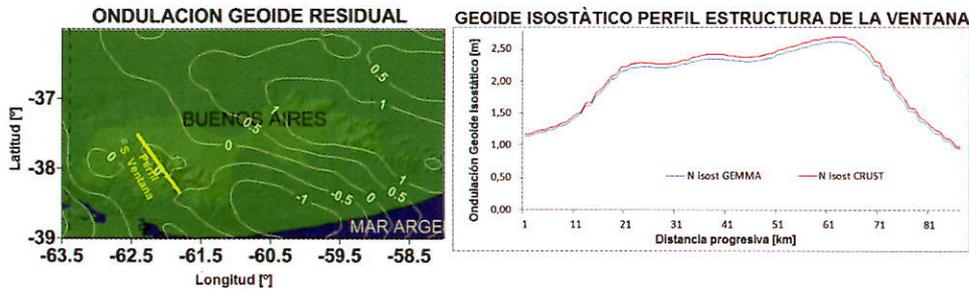


Figura 3. Ondulación del geode residual e isostático sobre perfil Estructura de la Ventana.

Se determinaron los desvíos (ecuación 6) que muestran el apartamiento de la estructura analizada del modelo isostático adoptado (Tabla 2). Se advierte que el promedio de los desvíos tiene valores próximos a -1.9m y -2.0m cuando se toman valores de GEMMA y CRUST, respectivamente, tanto para el geode residual de EGM2008 como de Eigen-6C4. La desviación estándar de los residuos es próxima a $\pm 0.40\text{m}$ en todos los casos, lo que muestra un ajuste razonable.

Con la finalidad de comparar morfológicamente las ondulaciones residuales a las isostáticas (Cornaglia, 2005), se llevó ambos perfiles a un origen común, corrigiendo el N_{isost} con el promedio de los desvíos. Posteriormente se calcularon los coeficientes de determinación (Walpole, et al., 2007) entre N_{res} y N_{isost} , obteniéndose en todos los casos un valor de 0.96, indicando buena correlación entre los valores isostáticos y observados. Estos resultados muestran que los parámetros usados para el modelo teórico de corteza en la estructura de la Sierra de la Ventana son apropiados, corroborando además que la estructura presenta un estado que tiende al equilibrio isostático.

Conclusiones

Es posible emplear la ondulación del geode isos-

tático sobre una estructura para inferir a partir de ella el balance isostático y las características corticales.

Analizando la estructura de las Sierras de la Ventana en el sistema de Airy, se obtuvo un geode isostático correspondiente a un modelo compensado, el que fue comparado con valores observados representados por modelos geopotenciales modernos debidamente filtrados.

Los resultados obtenidos permiten corroborar que la estructura presenta un estado que tiende al equilibrio isostático y que los parámetros usados para el modelo teórico de corteza son apropiados.

En consecuencia, este procedimiento, pone en evidencia que la ondulación isostática del geode podría ser apropiada para validar modelos de corteza, siempre que las estructuras analizadas tengan evidencias de estar isostáticamente equilibradas.

La utilización de modelos geopotenciales y modelos de corteza cada vez más precisos, permite proyectar estudios de fenómenos geofísicos apoyados en la infraestructura de datos SIRGAS.

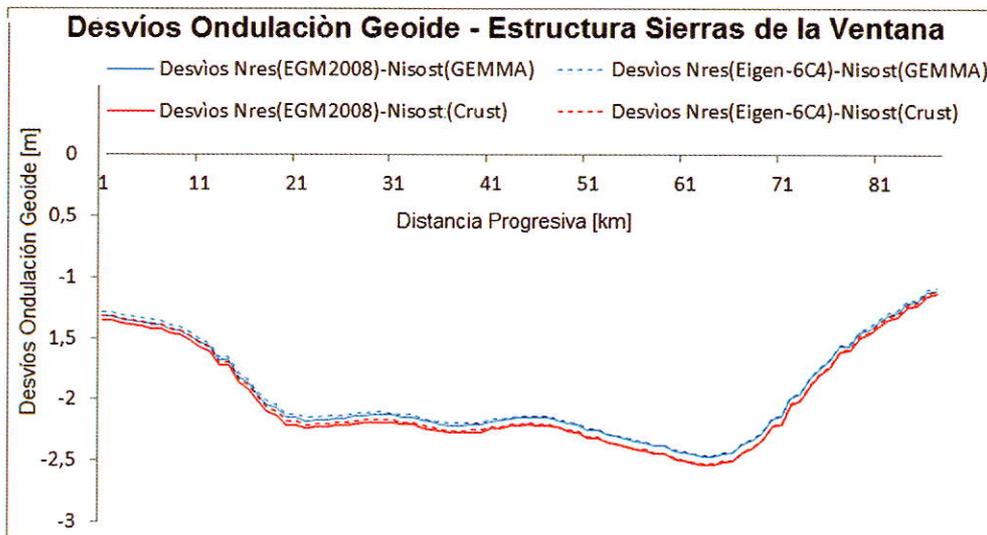


Figura 4. Desvíos del modelo isostático con parámetros de corteza GEMMA, y CRUST 1.0 respecto del geode residual resultante de los modelos EGM2008 y Eigen-6C4.

Tabla 2. Resumen estadístico de los desvíos entre geoide isostático y el geoide residual.

	Desvíos EGM2008		Desvíos EIGEN 6C4	
	Promedio [m]	Desv.Est. [m]	Promedio [m]	Desv.Est. [m]
Parámetros GEMMA	-1.97	±0.39	-1.95	±0.40
Parámetros CRUST 1.0	-2.03	±0.41	-2.01	±0.41

Referencias Bibliográficas

- Cornaglia, L. (2005). "Determinación del estado isostático y características corticales de las sierras de San Luis a partir de las ondulaciones del geoide".
- Del Cogliano, D. (2006). Modelado del Geoide con GPS y Gravimetría. Caracterización de la estructura geológica de Tandil. Tesis Doctoral. F.C.E.I.y.A – U.N.R.
- Fowler C. M. R., (2005). The solid earth. An introduction to Global Geophysics. - Cambridge University Press. 2 edition - 704 p. - ISBN 10: 521 89307 0. ISBN 13: 978-0521893077.
- Förste, Christoph; Bruinsma, Sean; Abrikosov, Oleh; Lemoine, Jean-Michel; Schaller T.; H.J. Götze; J. Ebbing, J.C. Marty, F. Flechtner, G. Balmino and R. Biancale (2014) EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse Haxby W. and Turcotte D., (1978). On isostatic geoid anomalies. Journal Geophysical Journal Vol. 94.(B4)3876-3890.
- Heiskanen W. and Moritz H. (1967) Physical Geodesy. W.H. Freeman and Company, San Francisco and London. 364 pág.
- Infante, C. (2013). Detección de estructuras geológicas potencialmente en equilibrio isostático a partir del análisis de modelos geopotenciales y anomalías de Bouguer. Tesis de Maestría. F.C.A.y.G. – U.N.L.P.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. and Factor, J.K. (2008) An Earth Gravitational Model to degree 2160: EGM2008. Paper presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.
- Sampietro, D and Reguzzoni, M. Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data. (2013) Submitted to Geophysical Journal International.
- Laske, Gabi; Ma, Zhitu; Masters, Guy; and Pasyanos, Michael (LLNL). (2013). CRUST 1.0. A New Global Crustal Model at 1x1 Degrees. Tocho, C. (2006). A gravimetric geoid modelling. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata. Tocho, C. y Pacino M.C. (2009). Evaluación del modelo geopotencial terrestre EGM 2008 en Argentina. XXIV Reunión Científica AAGG 2009. Torge, W. (2001). "Geodesy". 3rd. Edition. Walter de Gruyter GmbH & Co. Berlin-New York. 416 págs.



OBTENCIÓN DE COORDENADAS PRECISAS DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO PARA DETECCIÓN DE MOVIMIENTOS RÁPIDOS

Negrete, D¹; López, D¹ & Robayo, A²

¹Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente - Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE - Sangolquí - Ecuador

²Grupo de Investigación Geoespacial - Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE - Sangolquí - Ecuador
Email: aarobayo@espe.edu.ec

Resumen

Este trabajo busca diagnosticar el desplazamiento que podrían haber sufrido algunas las estaciones de monitoreo continuo de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador-REGME por el sismo registrado el 16 abril de 2016 a las 18:58:37 UTC, con una magnitud momento de 7.8 (según IG-EPN), entre los poblados de Pedernales y Cojimíes, en la zona norte de la provincia de Manabí. Para la selección de las estaciones de monitoreo continuo analizadas se tomó en cuenta la cercanía de la estación al epicentro y la disponibilidad de observaciones antes, durante y después del evento sísmico. El post procesamiento de las observaciones se realizó a través del software científico Bernese 5.2. Debido a la magnitud del sismo y con el propósito de evitar alteraciones en los resultados del trabajo por afectaciones en la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador; se realizó un procesamiento absoluto mediante la técnica de Posicionamiento de Punto Preciso-PPP, método que utiliza observables; código C/A y fase de las portadoras junto con archivos de efemérides precisas y correcciones de los relojes de los satélites, obteniendo resultados con nivel centimétrico de precisión.

Palabras Clave: Procesamiento de punto preciso-PPP, estaciones de monitoreo continuo, desplazamiento sísmico, REGME.

Abstract

This paper seeks to diagnose the displacement that might have suffered some GNSS stations of the GNSS Continuous Monitoring Network of Ecuador REGME, cause by the earthquake registered on April 16, 2016 at 18:58:37 UTC, with a moment magnitude of 7.8 (according to IG-EPN), located between the towns of Pedernales and Cojimíes, in the north of the province of Manabí. For the selection of continuous monitoring stations, it was considered the proximity of the station to the epicenter and the availability of observations before, during and after the seismic event. The post-processing of the observations was executed through scientific software Bernese 5.2. Due to the magnitude of the earthquake and with the purpose of avoiding changes in the results of work by affectations in the GNSS Continuous Monitoring Network of Ecuador; an absolute processing was performed using the technique of Precise Point Positioning-PPP, method that uses observables; C / A code and carrier phases with precise ephemeris files and satellite clock corrections, obtaining results with centimeter-level accuracy.

Keywords: Precise Point Processing-PPP, Continuous Monitoring Stations, Seismic Shift, Regme

INTRODUCCIÓN

Los constantes movimientos físicos a los que está sometida la superficie de la Tierra afectan la posición horizontal y vertical de un punto; estos cambios de posición deben ser identificados oportunamente ya que si no son corregidos pueden generar una serie de problemas en la cartografía y obras de ingenierías, especialmente en trabajos que utilizan datos de alta precisión. El presente trabajo busca identificar cómo se vieron afectadas en su posición horizontal las estaciones de monitoreo continuo QVEC, PJEC, ECEC y ESMR por el sismo del 16 abril de 2016, entre los poblados de Pedernales y Cojimíes, en la zona norte de la provincia de Manabí; ayudando así con el cumplimiento uno de los objetivos del IGM que es, mantener un Marco Geodésico de Referencia Nacional actualizado. La medición continua de puntos en el territorio nacional, es de gran importancia para la REGME, debido que permite registrar y analizar los desplazamientos de origen geodinámico (sismo – tectónico – volcánicos) que han sufrido los puntos con el paso del tiempo, brindando así la información necesaria con la cual se mantendrá el marco de referencia (IGM, Instituto Geográfico Militar, 2013).

METODOLOGÍA

La metodología empleada es presentada en las figura 1; y se describirá a continuación:

Selección de las estaciones de monitoreo continuo

Para la selección de las estaciones de monitoreo continuo, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cercanía de la estación al epicentro.
- Disponibilidad de datos RINEX antes, durante y después del evento sísmico

Las estaciones utilizadas para este estudio se presentan a continuación (Ver tabla 1):

Selección de periodo de análisis

Para notar los cambios en las coordenadas y facilitar el análisis se tomaron en cuenta tres periodos:

- Primer periodo: Cuatro semanas antes del sismo
- Segundo periodo: Día del sismo
- Tercer periodo: Dos semanas después del sismo

Selección del intervalo de observación

Para la descarga de datos se han tomado en cuenta los siguientes intervalos de observación:

- Observaciones con un intervalo 30 segundos para el primer y tercer periodo.
- Observaciones con un intervalo de 1 segundo para el segundo periodo.

Post procesamiento de datos

Antes del post procesamiento en software Ber-

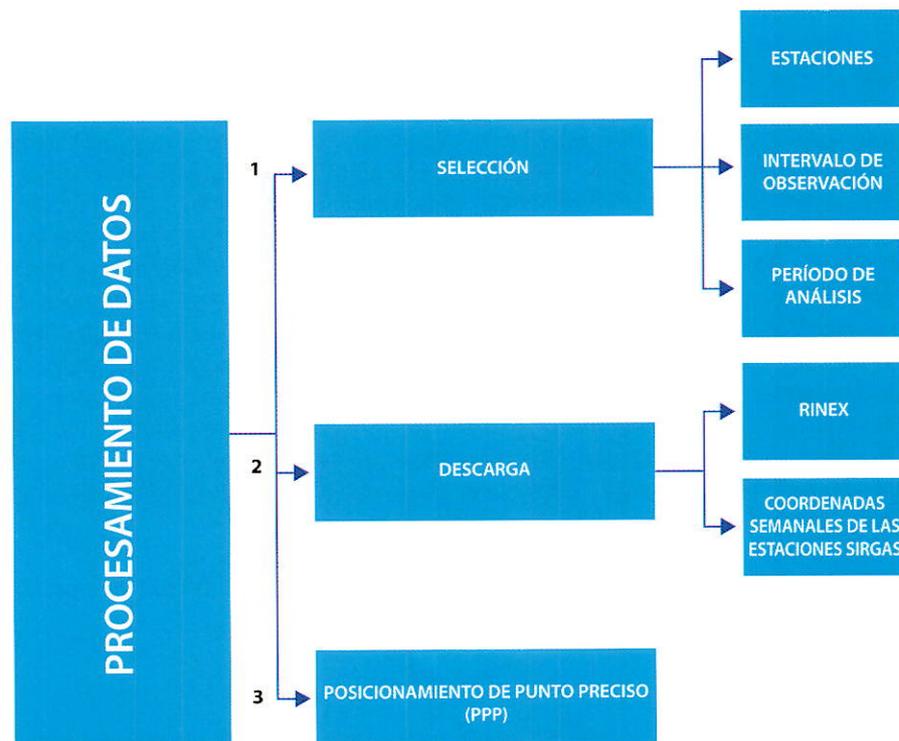


Figura 1. Metodología para el procesamiento de datos

Tabla 1. Estaciones seleccionadas para el procesamiento.

ESTACIÓN	PROVINCIA	CIUDAD	X (m)	Y (m)	Z(m)	DISTANCIA AL EPICENTRO (Km)
ESMR	Esmeraldas	Esmeraldas	1137650,1	-6275256,3	103347,771	68,66
ECEC	Manabí	El Carmen	1167630,03	-6270565,72	-30060,3314	83,7
QVEC	Los Ríos	Quevedo	1165494,1	-6269857,62	-111925,705	157,27
PJEC	Manabí	Paján	1060545,92	-6287136,62	-171639,146	218,74

Table 3.2: Processing steps for a zero-difference solution.

Processing step	Involved programs	Reference
1 Data transfer, copy data into the campaign	ftp	Chapter 4
2 PPP procedure to complete the list of a priori coordinates/velocities (if necessary)	BPE example PPP.PCF	Sec. 20.4.1
3 Data preprocessing 1	RNXSMT	Chapter 6
4 Import data into Bernese format	RXOBV3	Chapter 4
5 Prepare orbit and Earth orientation information	POLUPD. PRETAB. ORBGEN	Chapter 5
6 Data preprocessing 2	CODSPP. GPSEST. RESRMS. SATMRK	Chapter 6
7 Solution for epoch parameters and/or create normal equations	GPSEST	Chapter 7
8 NEQ-based multiseession solution	ADDNEQ2	Chapter 9

Figura 2. Rutina procesamiento PPP.

Fuente: Dach, R., Hugentobler, U., Frídez, P., & Meindl, M. (2007).

Tabla 2. Descripción de los programas a ejecutarse para la obtención de soluciones diarias y semanales.

RUTINA	DESCRIPCIÓN
POLUPDH	Conversión del archivo con los parámetros de orientación terrestre (EOP) del formato IGS al formato Bernese.
PRETAB	Transformación de las efemérides del IGS al sistema quasi-inercial ICRF
ORBGENH	Integración de las órbitas en el sistema quasi-inercial.
RNXSMT_H	Selección de los tipos de observación de acuerdo a la lista de prioridad que se da en V_OBSINF. Las observaciones de código se depuran, mientras que las mediciones de fase única se copian del archivo original en el nuevo archivo RINEX (extensión SMT).
RXOBV3_P	Conversión de archivos RINEX a formato Bernese.
CODSPP_P	Sincronización de los relojes de los receptores.
PPPEDT_P	Ejecuta los siguientes cinco programas de procesamiento, los cuales depuran los datos de la estación y se calcula la solución PPP. <ol style="list-style-type: none"> 1. GPSEST: genera un archivo residual para la detección de datos defectuosos basada en un combinación lineal ionosférica (L3). 2. RESRMS: muestra un archivo residual con los valores que superen un umbral determinado. 3. SATMRK: identifica valores atípicos en los archivos de observación. Las observaciones se mantienen en los archivos, y los valores antes identificados se marcan como malas observaciones. 4. GPSEST: continúa con el paso anterior depurando las observaciones que no eran buenas para el procesamiento. Los resultados se almacenan en archivos de resultados para su uso posterior. 5. ADDNEQ2: genera archivos de resultados de PPP para cada estación.

nese 5.2, se realizó el tratamiento de la información descargada del Geoportal del Instituto Geográfico Militar; para esto, se utilizó las siguientes herramientas (UNAVCO):

- crx2rnx: Descompresión de formato Hatanaka
- runpkr00: Descompresión de formato Trimble (R00 / T00 / T01 / T02).
- Teqc: Transformación, edición y control de calidad de datos

Una vez que los datos estuvieron listos; se realizó el post procesamiento mediante la técnica de Posicionamiento de Punto Preciso de manera automática a través de la herramienta Bernese Processing Engine (BPE), para lo cual se generó un Process Control Files (PCF) basado en el manual del usuario de Bernese 5.2, como se muestra en la Figura 2, este proceso ejecuta la siguiente rutina para la obtención de las soluciones.

Para analizar el comportamiento, los movimientos y desplazamientos de las estaciones durante el ciclo sísmico, se realizó el procesamiento en tres fases. Primero, en la etapa presísmica para verificar que las estaciones de monitoreo continuo se encuentren estables y funcionando correctamente se procesaron observaciones (30 segundos) un mes antes del evento sísmico. En la etapa cosísmica, se procesó las observaciones del día del evento con un intervalo de 1 segundo para determinar el comportamiento de la estación al momento de sismo. Como último paso y en la etapa post-sísmica, se procesaron las observaciones (30 segundos) un mes después de igual manera para comprobar que nuevamente se hayan estabilizado la observación y corroborar la variación de coordenadas y los desplazamientos que podrían haber sufrido las estaciones.

Resultados

Los resultados del procesamiento se los realizara de manera conjunta para las cuatro estaciones seleccionadas a través de una tabla que muestra las variaciones temporales que sufrieron las estaciones seleccionadas (tabla 3); gráficas de las series temporales de cada estación para cada coordenada cartesiana y una tabla con los desplazamientos registrados después del evento (tabla 4). Finalmente, se presenta un cuadro con los desplazamientos promedio que sufrieron las estaciones (tabla 5).

Estación El Carmen – ECEC

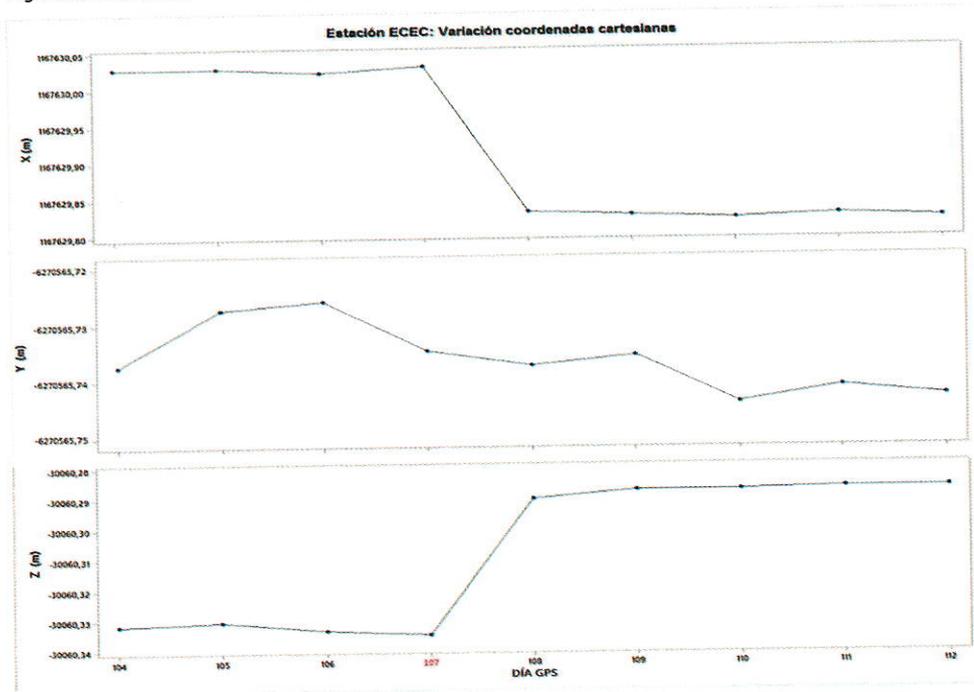
La figura 3 muestra el comportamiento diario de la estación de monitoreo continuo El Carmen – ECEC antes, durante y después del sismo. Hasta el día GPS 107 no se identifica ninguna discontinuidad en las coordenadas cartesianas tridimensionales, a partir del día 108 se puede apreciar desplazamientos en las coordenadas con valores aproximados de $\Delta x = 19 \text{ cm}$, $\Delta y = 0,5 \text{ cm}$ y $\Delta z = 5 \text{ cm}$.

En la figura 4 se muestra el comportamiento a cada segundo de la estación de monitoreo continuo El Carmen – ECEC el 16 abril de 2016 entre las 18:58:00 horas hasta las 19:01:00 horas. Desde las 18:58:00 horas hasta las 18:58:40 horas no se identifica ninguna discontinuidad en las coordenadas cartesianas tridimensionales, a partir de las 18:58:40 horas hasta las 18:59:10 horas se puede apreciar desplazamientos en las coordenadas con valores entre $25 \text{ cm} > \Delta x > 5 \text{ cm}$, $6 \text{ cm} > \Delta y > 2 \text{ cm}$ y $7 \text{ cm} > \Delta z > 1 \text{ cm}$. Luego de las 18:59:10 horas se puede apreciar que la estación se estabiliza con desplazamientos de aproximados de $\Delta x = 19 \text{ cm}$, $\Delta y = 0.5 \text{ cm}$ y $\Delta z = 5 \text{ cm}$.

Tabla 3. Variaciones temporales sufridas por las estaciones.

FECHA	DÍA GPS	Variación coordenadas cartesianas											
		ECEC			QVEC			ESMR			PJEC		
		X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
13/04/2016	104	0.00	-0.99	-0.11	0.90	0.31	-0.54	0.09	-0.94	0.08	0.66	-0.92	-0.27
14/04/2016	105	0.67	-0.15	0.30	0.07	-2.04	0.35	0.19	-0.14	-0.16	0.17	-0.37	0.00
15/04/2016	106	-0.85	0.88	0.14	-0.67	1.26	-0.17	0.91	0.18	0.20	-1.12	-0.06	0.34
16/04/2016	107	19.91	0.27	-4.45	5.54	-0.24	-3.09	2.25	-1.88	1.26	0.64	0.47	0.80
17/04/2016	108	0.41	-0.17	-0.28	0.40	0.08	-0.51	0.27	0.57	0.20	0.00	0.00	0.00
18/04/2016	109	0.48	0.83	0.01	-0.30	1.70	0.06	-0.12	0.02	-0.13	0.71	-1.05	-0.26
19/04/2016	110	-0.39	-0.28	-0.07	0.91	-0.28	0.04	0.05	0.15	0.27	0.59	0.82	0.26
20/04/2016	111	0.38	0.17	-0.01	-0.49	-0.20	0.18	0.20	-0.39	0.08	-0.24	0.01	0.58
21/04/2016	112												

Figura 3. Variación coordenadas cartesianas, Estación ECEC.



Estación Quevedo – QVEC

La figura 5 muestra el comportamiento diario de la estación de monitoreo continuo Quevedo – QVEC antes, durante y después del sismo. Hasta el día GPS 107 no se identifica ninguna discontinuidad en las coordenadas cartesianas tridimensionales, a partir del día 108 se puede apreciar desplazamientos en las coordenadas con valores aproximados de $\Delta x = 5 \text{ cm}$, $\Delta y = 0,5 \text{ cm}$ y $\Delta z = 3 \text{ cm}$.

En la figura 6 se muestra el comportamiento a cada segundo de la estación de monitoreo conti-

nuo Quevedo – QVEC el 16 abril de 2016 entre las 18:58:00 horas hasta las 19:01:00 horas. Desde las 18:58:00 horas hasta las 18:58:42 horas no se identifica ninguna discontinuidad en las coordenadas cartesianas tridimensionales, a partir de las 18:58:42 horas hasta las 18:59:15 horas se puede apreciar desplazamientos en las coordenadas con valores entre $10 \text{ cm} > \Delta x > 3 \text{ cm}$, $3 \text{ cm} > \Delta y > 1 \text{ cm}$ y $8 \text{ cm} > \Delta z > 1 \text{ cm}$. Luego de las 18:59:15 horas se puede apreciar que la estación se estabiliza con desplazamientos de aproximados de $\Delta x = 5 \text{ cm}$, $\Delta y = 0,5 \text{ cm}$ y $\Delta z = 3 \text{ cm}$.

Figura 4. Variación coordenadas cartesianas durante ciclo sísmico, Estación ECEC

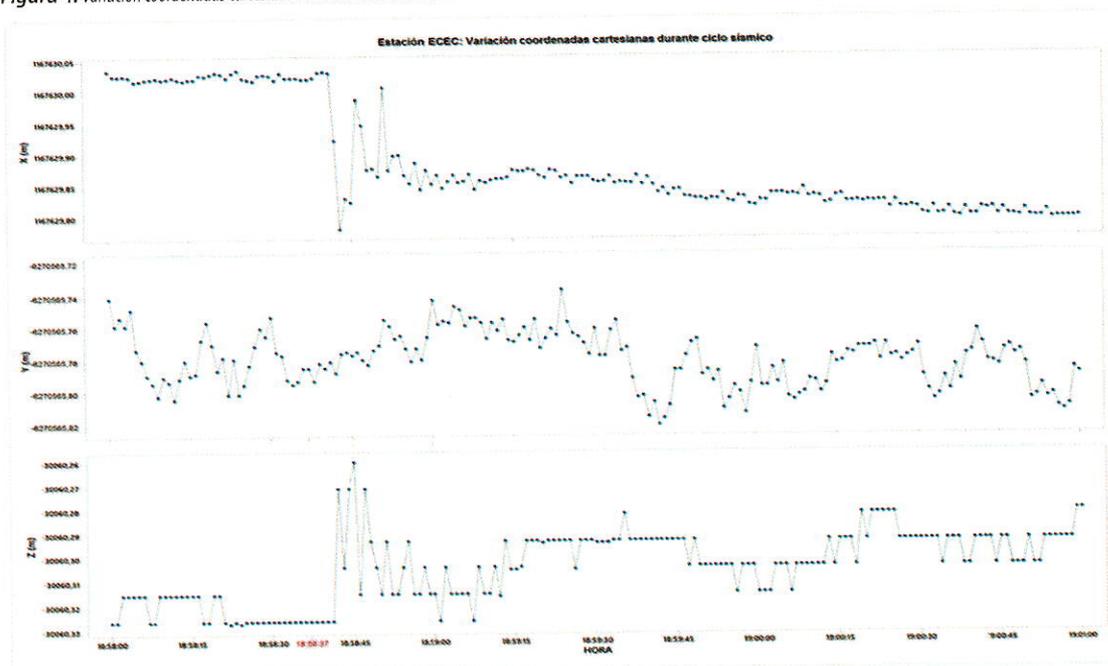
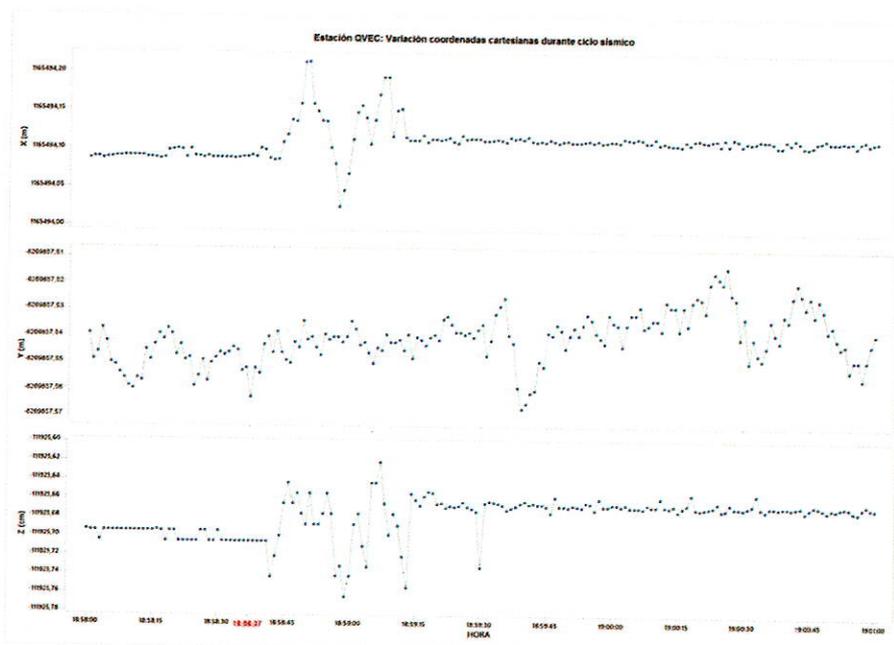


Figura 5. Variación coordenadas cartesianas, Estación QVEC.



Estación Esmeraldas – ESMR

La figura 7 muestra el comportamiento diario de la estación de monitoreo continuo Esmeraldas – ESMR antes, durante y después del sismo. Hasta el día GPS 107 no se identifica ninguna discontinuidad en las coordenadas cartesianas tridimensionales, a partir del día 108 se puede apreciar desplazamientos en las coordenadas con valores aproximados de $\Delta x = 3 \text{ cm}$, $\Delta y = 1,5 \text{ cm}$ y $\Delta z = 1,5 \text{ cm}$.

La figura 8 muestra el comportamiento a cada 30 segundos de la estación de monitoreo continuo Esmeraldas – ESMR el 16 abril de 2016 entre las 18:54:00 horas hasta las 19:04:00 horas. Desde las 18:54:00 horas hasta las 18:59:00 horas no se

identifica ninguna discontinuidad en las coordenadas cartesianas tridimensionales, a partir de las 18:59:00 horas hasta las 18:59:30 horas se puede apreciar desplazamientos en las coordenadas con valores entre $3 \text{ cm} > \Delta x > 1 \text{ cm}$, $4 \text{ cm} > \Delta y > 1 \text{ cm}$ y $1 \text{ cm} > \Delta z > 0,5 \text{ cm}$. Luego de las 18:59:30 horas se puede apreciar que la estación se estabiliza excepto en la coordenada Y. Ya estabilizada completamente la estación se obtuvieron desplazamientos aproximados de $\Delta x = 3 \text{ cm}$, $\Delta y = 1,5 \text{ cm}$ y $\Delta z = 1 \text{ cm}$.

Estación Paján – PJEC

La figura 9 muestra el comportamiento diario de la estación de monitoreo continuo Paján – PJEC antes, durante y después del sismo. Hasta el día GPS

Figura 6. Variación coordenadas cartesianas durante ciclo sísmico, Estación QVEC.

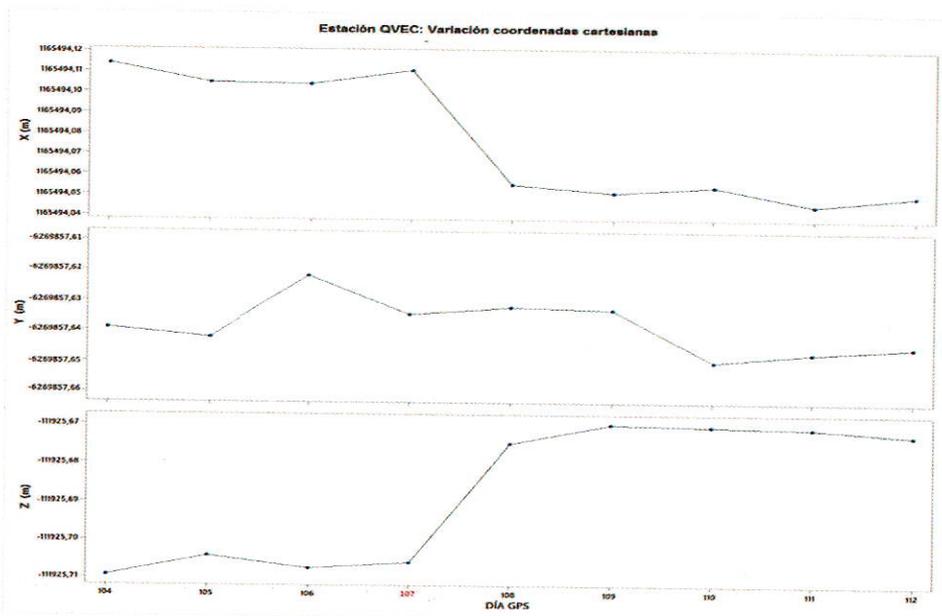
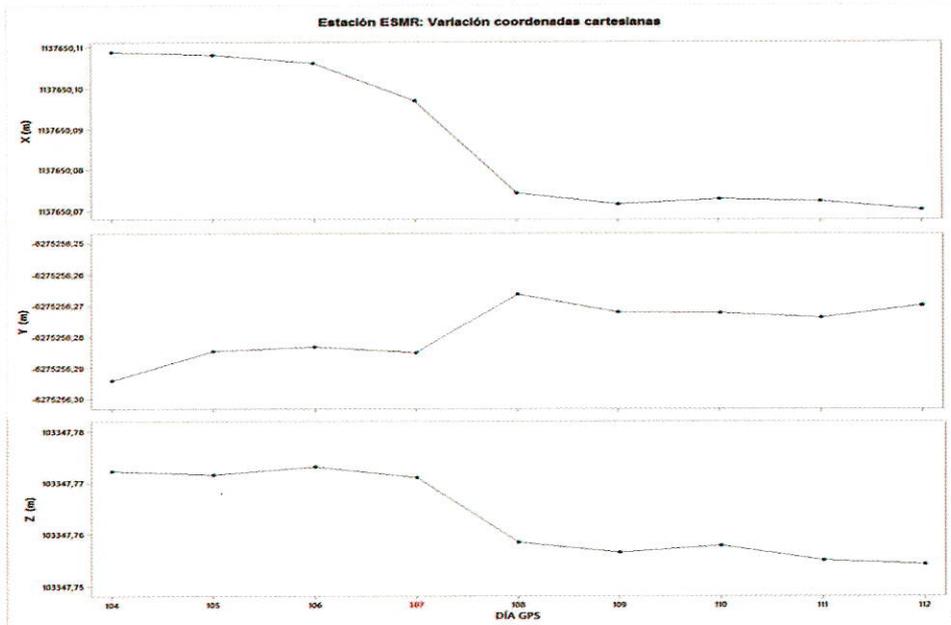


Figura 7. Variación coordenadas cartesianas, Estación ESMR.



107 no se identifica ninguna discontinuidad en las coordenadas cartesianas tridimensionales, a partir del día 108 se puede apreciar desplazamientos en las coordenadas con valores aproximados de $\Delta x = 1,5$ cm, $\Delta y = 0,5$ cm y $\Delta z = 1$ cm.

hasta las 19:01:00 horas no se identifica ninguna discontinuidad en las coordenadas cartesianas tridimensionales, pero se pueden apreciar desplazamientos en las coordenadas con valores entre $1,5$ cm $> \Delta x > 0$ cm, 1 cm $> \Delta y > 0$ cm y 1 cm $> \Delta z > 0$ cm.

La figura 10 muestra el comportamiento a cada segundo de la estación de monitoreo continuo Paján - PJEC el 16 abril de 2016 entre las 18:58:00 horas hasta las 19:01:00 horas. Desde las 18:58:00 horas

Figura 8. Variación coordenadas cartesianas durante ciclo sísmico, Estación ESMR.

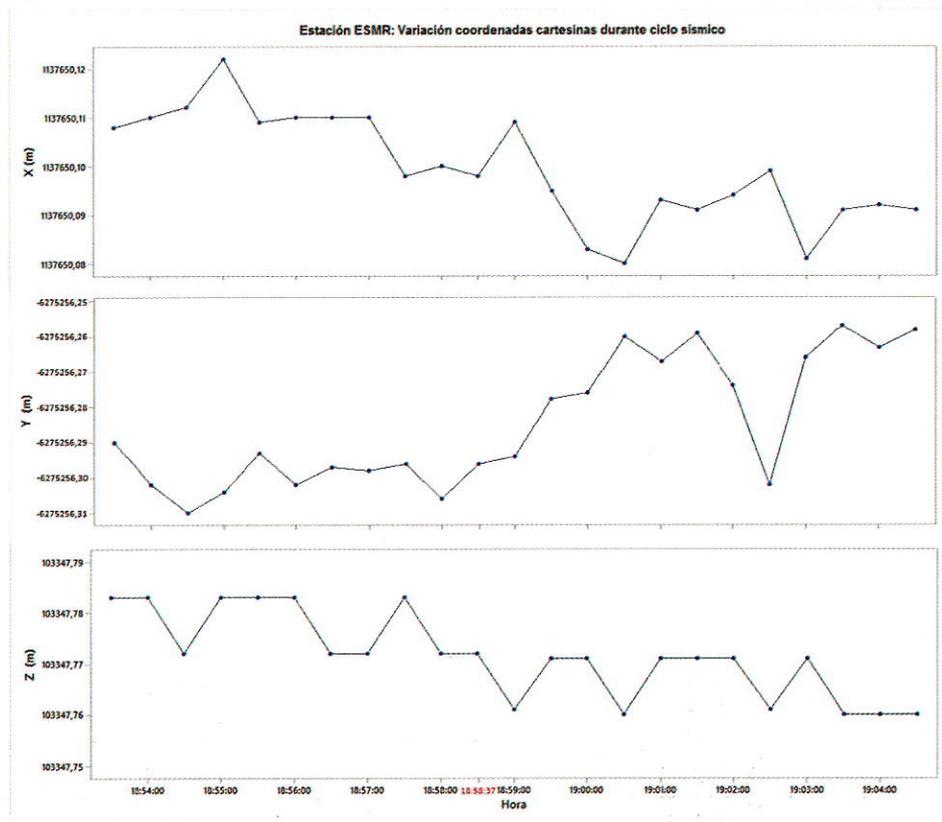


Figura 9. Variación coordenadas cartesianas, Estación PJEC.

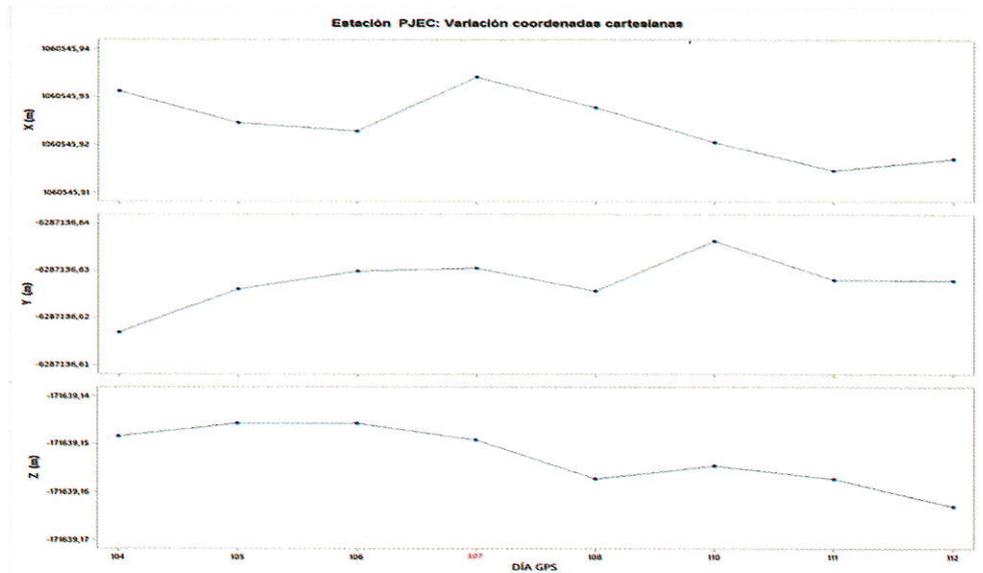


Figura 10. Variación coordenadas cartesianas durante ciclo sísmico, Estación PJEC.

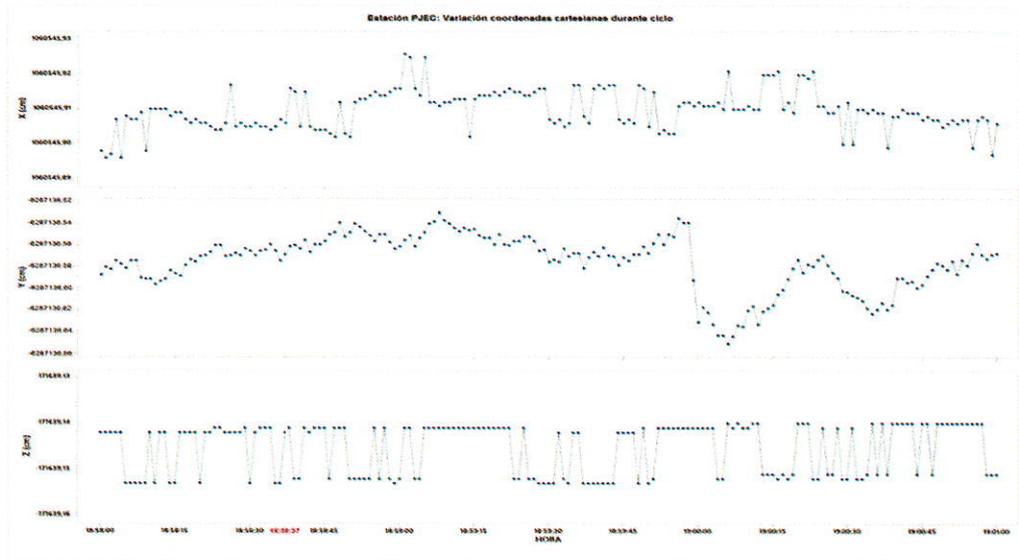


Tabla 4. Desplazamientos registrados después del evento.

DÍA GPS	Variación coordenadas cartesianas											
	ECEC			QVEC			ESMR			PJEC		
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
108	19,91	0,27	-4,45	5,54	-0,24	-3,09	2,25	-1,88	1,26	0,64	0,47	0,80
109	20,32	0,10	-4,73	5,94	-0,16	-3,60	2,52	-1,31	1,46	No hay datos		
110	20,80	0,93	-4,72	5,64	1,54	-3,54	2,40	-1,29	1,33	1,35	-0,58	0,54
111	20,41	0,65	-4,79	6,55	1,26	-3,50	2,45	-1,14	1,60	1,94	0,24	0,80
112	20,79	0,82	-4,80	6,06	1,06	-3,32	2,65	-1,53	1,68	1,70	0,25	1,38
Promedio	20,45	0,55	-4,70	5,95	0,69	-3,41	2,45	-1,43	1,47	1,41	0,10	0,88

Tabla 5. Desplazamientos promedio sufridos por las estaciones.

Estaciones	Desplazamientos								
	ECEC				ENU				
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Módulo (cm)	N (cm)	E (cm)	U (cm)	Módulo (cm)	
ECEC	20,45	0,55	-4,70	20,99	-4,68	20,20	3,22	20,99	
QVEC	5,95	0,69	-3,41	6,89	-3,41	5,97	0,42	6,89	
ESMR	2,45	-1,43	1,47	3,20	1,47	2,15	1,85	3,20	
PJEC	1,41	0,10	0,88	1,66	0,88	1,40	0,16	1,66	

Conclusiones

El posicionamiento absoluto mediante la técnica de Posicionamiento de Punto Preciso-PPP, es un buen método que permite determinar la detección de movimientos rápidos y diagnosticar el comportamiento de la estación a cada segundo.

En el sismo del 16 de abril del 2016, todas las estaciones de monitoreo continuo analizadas presentaron desplazamientos permanentes en sus coordenadas, siendo la estación ECEC la más afectada con un desplazamiento promedio de 20,99 cm; las otras estaciones presentan variaciones posicionales menores que van entre 6,89 cm y 1,67 cm.

Los desplazamientos de las estaciones de monitoreo continuo causados por un sismo no son directamente proporcionales a la distancia del epicentro, dependen también de las características geomorfológicas del terreno, es así que la estación de Esmeraldas - ESMR con una distancia de 68,66 km al epicentro presentó un desplazamiento de 3,20 cm, mientras que la estación de El Carmen - ECEC que está a 83,70 km tuvo un desplazamiento mayor de 20,99 cm.

Referencias Bibliográficas

- Acuña, G. (2008). Introducción al Posicionamiento GPS de Punto Preciso (PPP): Fundamentos Teóricos. Recuperado el 1 de julio de 2016, de http://www.ppp%20acu%20gustavo_files/frame0.html
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., & Meindl, M. (2007). Bernese GPS Software Version 5.2. Recuperado el 28 de febrero de 2016, de Bernese GNSS Software: <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf>
- IGM, Instituto Geográfico Militar. (2013). Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador - REGME. Recuperado el 19 de marzo de 2016, de IGM, Instituto Geográfico Militar: <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/wp-content/uploads/2013/01/RED-GNSS-DE-MONITOREO-CONTINUO-DEL-ECUADOR.pdf>
- IG-EPN, Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. (2016). INFORME SÍSMICO ESPECIAL N. 13 - 2016. Recuperado el 19 de abril de 2016, de <http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1317-informe-sismico-especial-n-13-2016>
- SIRGAS (2016). Coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS-CON. Recuperado el 15 de junio de 2016. Sitio web: <http://www.sirgas.org/index.php?id=153>.

GRAVIMETRÍA EN EL ECUADOR

Flores, F & Pozo, M

Gestión de Geoinformación • Instituto Geográfico Militar • Quito-Ecuador

Proceso de Geodesia (+593) 2 3975 100 • Ext: 2013

Email: fredy.flores@mail.igm.gob.ec • Email: miguel.pozo@mail.igm.gob.ec

Resumen

La gravimetría está constituida por un conjunto de técnicas que tiene la finalidad de determinar el campo de gravedad terrestre, debido a una desigual repartición de masas en la corteza. Para conocer este campo de gravedad se deben realizar mediciones de la gravedad con diferentes tipos de gravímetros y metodologías que conduzcan a un establecimiento y materialización de redes gravimétricas de referencia. Dentro de las diferentes metodologías de medición encontramos mediciones absolutas y relativas las mismas que fueron realizadas en todo el mundo para alcanzar los propósitos anteriormente descritos. El Ecuador no es la excepción, algunas décadas atrás se realizaron múltiples trabajos gravimétricos llegando a establecer estaciones de referencia enlazadas a un datum gravimétrico mundial, posteriormente, en base al sistema de referencia establecido, se realizaron campañas de campo para implantar la Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador. El presente trabajo indica la evolución que ha tenido la gravimetría en el Ecuador, desde sus inicios hasta la actualidad, tomando en cuenta el avance tecnológico que nos permita cumplir objetivos que ayuden a la determinación de un Datum Gravimétrico Mundial de alta precisión en base a mediciones absolutas de gravedad.

Palabras Claves: gravimetría, geode, números geopotenciales, IGSN71, RELANG77, SIRGAS.

Abstarct

The gravimetry is constituted by a set of techniques that has the purpose to determine the field of terrestrial gravity, due to an unequal distribution of masses in the crust. In order to know this field of gravity, gravity measurements must be carried out with different types of gravimeters and methodologies that lead to the establishment and materialization of gravimetric reference networks. Within the different methodologies of measurement we find absolute and relative measurements that were carried out all over the world to achieve the purposes described above. Ecuador is no exception. Several decades ago, several gravimetric studies were carried out, establishing reference stations linked to a global gravimetric datum. Later, based on the established reference system, field campaigns were carried out to implement the Fundamental Gravimetric Network Ecuador. The present work shows the evolution of gravimetry in Ecuador, from its beginnings to the present, taking into account the technological progress that allows us to meet objectives that help the determination of a World Gravimetric Datum of high precision based on measurements Absolute gravity.

Keywords: gravimetry, geoid, geopotential numbers, IGSN71, RELANG77, SIRGAS.

Introducción

Uno de los objetivos fundamentales para el establecimiento de una red de gravimétrica es el de crear un marco de referencia de control para estudios gravimétricos aplicados en la geodesia, geofísica, geodinámica, etc. Hablamos de sistema de referencia gravimétrico como una definición convencional del valor de la gravedad y un marco de referencia gravimétrico a la materialización física de dicho sistema.

Las redes de gravedad pueden ser globales, regionales o locales y su establecimiento está basado en etapas de diseño, medición (observaciones de gravedad absolutas y/o relativas), cálculo y compensación o ajuste.

El Instituto Geográfico Militar (IGM), encargado de la determinación y mantenimiento del sistema de referencia geodésico del país, estableció en los años 2002 y 2003 la Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador la misma que contó con apoyo del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE) de la Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo (UPSP) y del Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR). Esta red está conformada por 41 puntos distribuidos homogéneamente en el país, fue medida con gravímetros relativos Lacoste&Romberg densificada mediante valores relativos a través de un punto de orden superior como es el perteneciente a la Red Mundial IGSN71 ubicada en el subsuelo de Observatorio Astronómico de la ciudad de Quito. A partir de esta red se han realizado un sinnúmero de observaciones gravimétricas a lo largo del país, sobre todo la densificación sobre líneas de nivelación, ríos navegables de la Amazonía o mallas con equidistancia de 5Km así como y la generación de un banco de datos gravimétricos de aproximadamente 5000 puntos en el país.

Evolución histórica

El primer sistema gravimétrico de referencia internacional "Potsdam" se introdujo en 1909 en la conferencia de la Asociación Geodésica Internacional (IGA) celebrada en Londres, este sistema se basó en el valor medido por péndulos entre 1898 y 1904 por Kühnen y Furtwängler y se propagó por mediciones de péndulos relativos con una precisión de ± 3 mGal. (Drewes 2016).

En 1845 F.W. Bessel diseñó un péndulo reversible simétrico respecto de su centro geométrico (Ver Figura 1.), lo que permitió eliminar los errores de medición relacionados con la resistencia del aire, la flotabilidad del péndulo y la forma específica de las cuchillas de oscilación (UNAV 2012).

Después de la segunda guerra mundial se realizaron mediciones globales por parte de la Comisión Gravimétrica Internacional de la Asociación Interna-

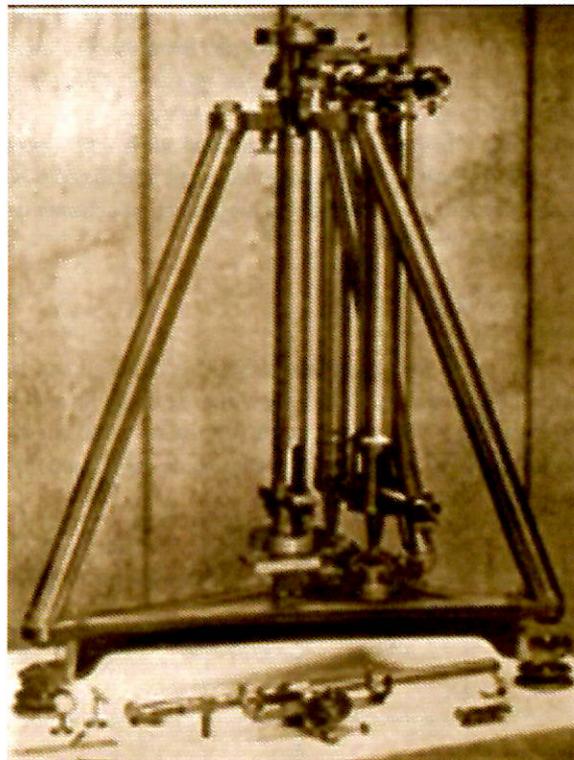


Figura 1. Péndulo REPSOLD

cional de Geodesia (IAG) con gravímetros relativos efectuándose varias mediciones gravimétricas relativas, pendulares y mediciones absolutas de gravedad, estableciéndose así "The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71)" (Morelli 1974).

En los años 1903 y 1906, la Segunda Misión Geodésica Francesa en el Ecuador hace una determinación de la gravedad en el cuarto del sismógrafo del Observatorio Astronómico a 6 metros de los cimientos del telescopio de observaciones.

Con motivo de las actividades del año Geofísico Internacional, se realizan las observaciones gravimétricas para enlazar las estaciones de referencia mundial, en el periodo de agosto a diciembre de 1958. Estas mediciones se efectúan con el aparato pendular "Cambridge" en las estaciones de las siguientes ciudades: Teddington, Madison, México, Panamá, Quito, Lima, La Paz, Santiago de Chile, Buenos Aires, Río de Janeiro y Caracas.

En 1963, con nueve gravímetros relativos Lacoste&Romberg se observó la línea de calibración que va desde Punto Barrow- Ciudad de México hasta Ushuaia en Argentina, con el objetivo de establecer control en las estaciones bases de los países americanos. Este trabajo se realizó para cumplir con las recomendaciones que se hicieron en la reunión de la Comisión Gravimétrica Internacional en París en 1962 y similares resoluciones que se adoptaron en 1963 en Berkley en la Unión Geodésica y Geofísica Internacional. Esta línea se midió en tres secciones que

van desde el punto Barrow (Alaska) hasta Houston, de Houston a Panamá Norte y de Panamá Sur hasta Ushuaia. En el Ecuador se miden dos estaciones en el aeropuerto de Guayaquil y otras dos en Quito, Aeropuerto y Observatorio Astronómico. Posteriormente se determinan otras cinco estaciones adicionales en estas ciudades estableciendo así nueve estaciones de referencia (Ver Figura 2).

IGSN71

La estructura de la Red IGSN71 está basada en 10 mediciones gravimétricas absolutas de caída libre con una precisión de $\pm 0,01$ hasta $0,1$ mGal; 1200 mediciones por péndulo con precisiones de $\pm 0,2$ hasta $0,4$

mGal y 24000 mediciones gravimétricas relativas con una precisión de $\pm 0,02$ hasta $0,2$ mGal (Ver Figura 3).

La diferencia entre el valor de gravedad de Potsdam con los nuevos resultados obtenidos en IGSN71 fue de -14 mGal.

En la actualidad, de las 9 estaciones establecidas, tan solo una se encuentra en buenas condiciones y es la ubicada en el subsuelo del Observatorio Astronómico de Quito, código: 33208A. Con esta estación se iniciaron las mediciones relativas para el establecimiento de la Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador, enlazada al Sistema de Referencia Mundial IGSN71, que sigue siendo aún el dato oficial de la gravedad en todo el mundo.

CODIGO IGSN71	CIUDAD	UBICACIÓN	FOTOGRAFÍA	CROQUIS
33208A	QUITO	OBSERVATORIO ASTRONÓMICO		
33208J	QUITO	AEROPUERTO MARISCAL SUCRE		
33208K	QUITO	AEROPUERTO MARISCAL SUCRE		
33208L	QUITO	AEROPUERTO MARISCAL SUCRE		
33229L	GUAYAQUIL	AEROPUERTO SIMÓN BOLÍVAR		
33229M	GUAYAQUIL	AEROPUERTO SIMÓN BOLÍVAR		
33229N	GUAYAQUIL	PUERTO MARITIMO		
33229P	GUAYAQUIL	MONUMENTO SIMÓN BOLÍVAR Y SAN MARTÍN	S/F	
33229K	GUAYAQUIL	AEROPUERTO SIMÓN BOLÍVAR		

Figura 2. Estaciones de referencia del Ecuador



Figura 3. Red mundial IGSN71 (Morelli et al., 1974)

RELANG 77

A partir de estas redes mundiales, se establecieron redes de carácter continental como la Red Latinoamericana de Normalización de la Gravedad (RELANG) de 1977 determinada por 965 estaciones de referencia interconectadas por 4475 mediciones gravimétricas relativas efectuadas entre los años de 1962 y 1976 (Ver Figura 4) por varias agencias nacionales en coo-

peración con el Servicio Geodésico Interamericano (IAGS).(SILAG 1979).

El cálculo, ajuste y compilación de datos de esta red la realizó el Earth Physic Branch (EPB).

En el país se determinaron 23 estaciones: Coca, Cuenca, Esmeraldas, Gualaquiza, Huaquillas, La Toma, Limoncocha, Macará, Macas, Manta, Montal-



Figura 4. Red RELANG77

vo, Nuevo Rocafuerte, Pastaza, Quevedo, Riobamba, Salinas, Sta. Cecilia (2), San Lorenzo, Taisha, Tena, Tulcán y Villano (Ver Figura 5).

Adicionalmente, a partir de estas redes, se realizaron densificaciones gravimétricas sobre líneas de nivelación en todo el país encontrándose mediciones en los años de 1966 hasta 1970, en 1977 y en 1994 sin tener ningún documento técnico que indique metodologías de trabajo, procesamiento de la información e informe técnico que avale dichos trabajos.

Red gravimétrica fundamental del Ecuador (REGFE)

En el país, gracias a la colaboración de la Universidad de Sao Paulo (UPSP), el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE) y el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR), el IGM logró la implementación en el país de una Red Gravimétrica Fundamental enlazada a la red mundial IGSN71, dicha red se midió en los años 2002 y 2003 con 5 gravímetros relativos marca Lacoste & Romberg, modelo G, operados por personal de Brasil y Ecuador. Se estableció una intensa y compleja estructura operacional, con traslados terrestres, marítimos, aéreos y fluviales.

Esta red nacional consta de 39 estaciones principales y 2 excéntricas (GPS Puyo y Baltra Faro), que cubren el territorio continental e insular, materializadas sobre el terreno con placas de aluminio o sobre hitos de concreto tipo IGM-A o IGM-B. (Ver Figura 6).

Circuitos gravimétricos:

Un circuito gravimétrico es el enlace que se efectúa con la finalidad de determinar las diferencias de valores de *g* existente entre dos o más estaciones gravimétricas, de las cuales al menos una es de gravedad conocida. (Torres, M. 2005).

Las observaciones de las estaciones de la REGFE se realizaron con 5 gravímetros relativos marca Lacoste&Romberg, modelo G, implementando circuitos denominados “de ida y vuelta”, que consiste en iniciar la medición en una estación con valor de gravedad conocida y el circuito se cierra en la misma o en otra estación, de igual manera, con valor de gravedad conocida. Esta metodología nos permite tener más de una medición de gravedad en cada estación con el fin de obtener el valor medio más preciso de aceleración de gravedad.

Otro factor importante en la medición de la REGFE fue el monitoreo del tiempo de cierre de cada circuito permitiendo así la corrección de los efectos causados por la deriva instrumental del equipo.

Con estos antecedentes se midieron 31 circuitos de referencia en tres etapas con metodologías distintas:

- Circuitos iniciando y terminando en la estación de la Red IGSN71 33208A (Observatorio Astronómico)
- Circuitos que iniciaron y terminaron en una misma estación de referencia no ajustada.
- Circuitos que iniciaron en una estación no ajustada y terminaron en otra estación diferente no ajustada.

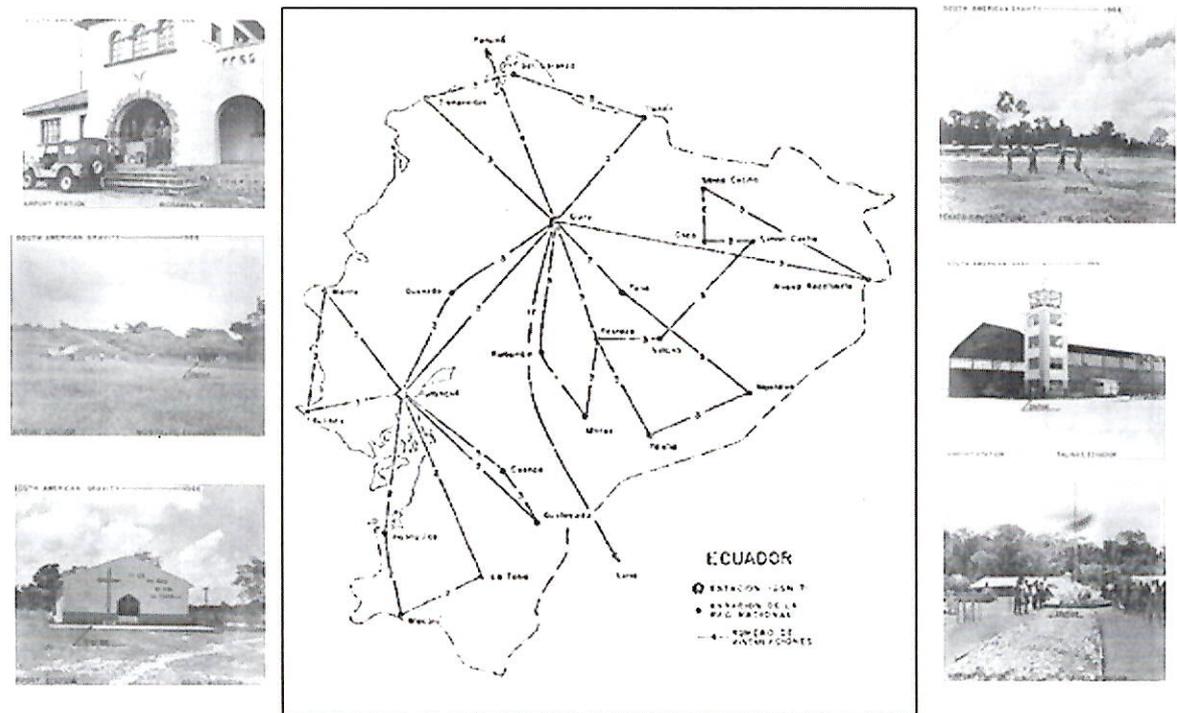


Figura 5. Red RELANG 77 en ECUADOR

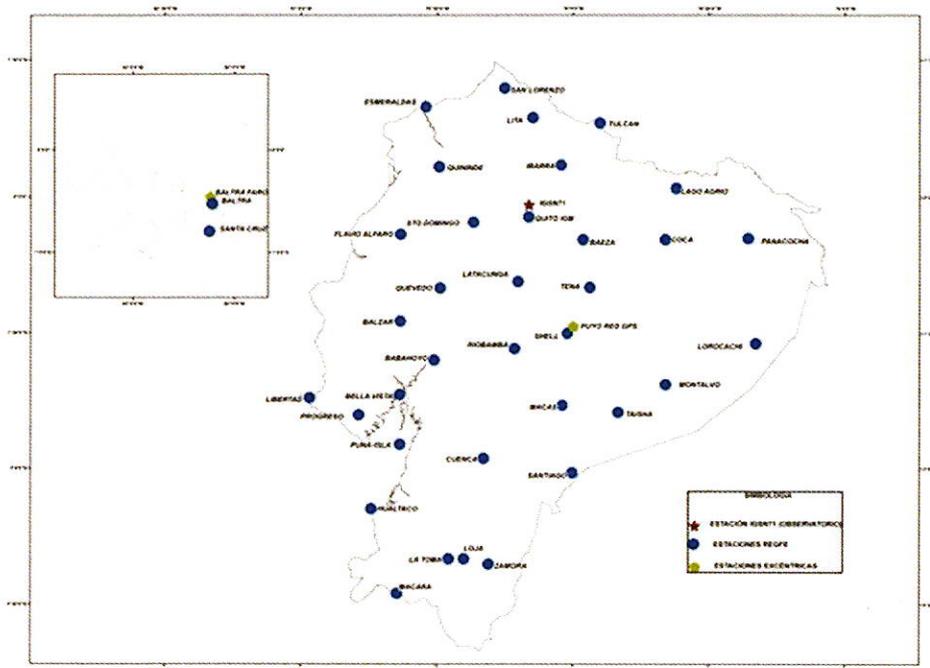


Figura 6. Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador

En el siguiente gráfico (Ver Figura 7) se muestra la implantación de todos los circuitos para el establecimiento de la Red gravimétrica Fundamental del Ecuador.

Procesamiento de la Información.

El procesamiento de los datos consiste en calcular la media de las lecturas realizadas con el gravímetro (3 lecturas), se efectúa la corrección luni – solar, se transforman las lecturas en valores de aceleración (mGal), se corrige las derivas dinámicas y si fuese el caso las

estáticas. Finalmente con las diferencias de aceleración entre los puntos y con el valor de *g* conocido de la estación de referencia se calculan los valores de aceleración de las estaciones medidas. (Blitzkow, 2003)

Para el ingreso de la información de campo se utilizó el programa **GRAVI96**, el mismo que funciona en la plataforma DOS y creado en conjunto entre la EPUSP y el IBGE de Brasil. En este programa se ingresó toda la información del circuito gravimétrico (línea) con una codificación alfa numérica única para esa línea. De igual manera se ingresó la información

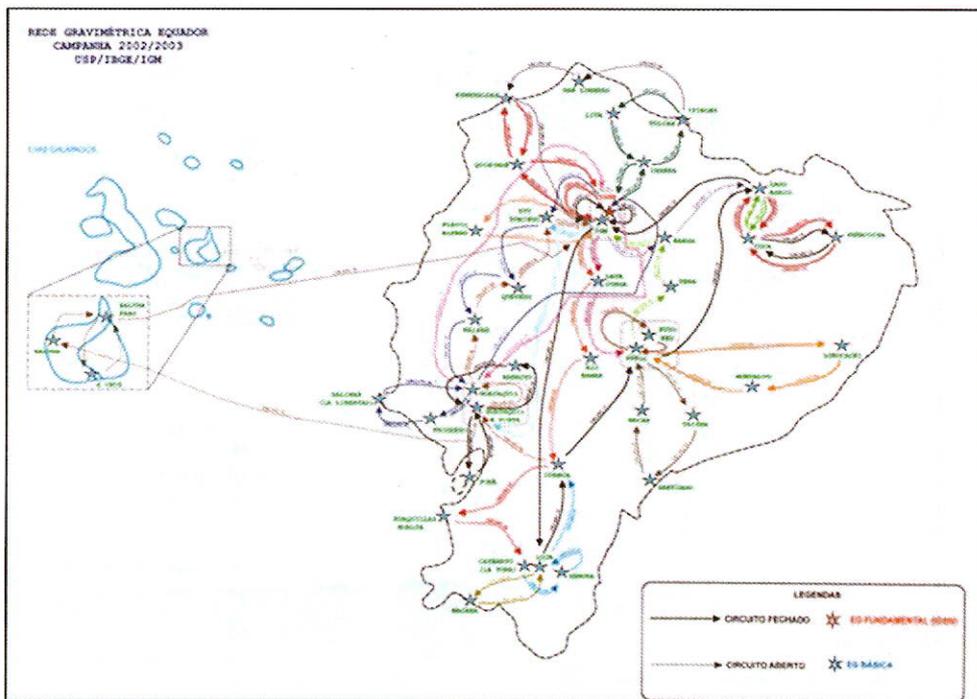


Figura 7. Circuitos medidos REGFE

de cada una de las estaciones de la REGFE con un código numérico único para las 41 estaciones medidas. El archivo resultante de cada línea ingresada tiene la extensión .DAT, este archivo se ingresa en otro programa denominado **REDGRAV** en el que se hace la reducción de las observaciones gravimétricas, corrección luni-solar, derivas estática y dinámica, anomalías Aire Libre y Bouguer así como el cálculo de la gravedad normal en base al elipsoide GRS80.

Con los resultados obtenidos en el procesamiento de las líneas de cada uno de los gravímetros, se calculó el valor medio de las estaciones determinando, de esta manera, los valores preliminares de la REGFE en el año 2003. Dichos valores han sido la base de referencia para iniciar los trabajos de densificación gravimétrica sobre líneas de nivelación en el Ecuador.

Ajuste de las observaciones

Posteriormente en el año 2006, el IBGE, realiza el ajuste de la REGFE por el método paramétrico, utilizando como estación fija la 33208A de la Red IGSN71 (Observatorio Astronómico) con un valor de aceleración de gravedad de 977263.18 mGal y una precisión de ± 0.019 mGal. La matriz de pesos considerada en el ajuste se la estableció en base a la desviación estándar de cada observación en relación a la media, se usaron el 100% de las observaciones y un nivel de confianza del 95% (Castro, 2005).

Densificación gravimétrica sobre líneas de nivelación

El 2003 fue el año en el que se iniciaron los primeros trabajos de densificación gravimétrica sobre líneas de nivelación en el país, tomando como referencia la REGFE establecida un año atrás. Como mencionamos anteriormente ya se realizaron mediciones de gravedad sobre líneas de nivelación en los años 70 y 80 peros sin tener registro alguno del procesamiento de datos ni metodología utilizada.

Hasta el momento se tiene en la Base de Datos Gravimétrica del IGM alrededor de 5000 puntos medidos en el territorio nacional, información importante que servirá para el cálculo de números geopotenciales y el ajuste de la Red de Control Básico Vertical del país, proyecto que lidera el Grupo de Trabajo III de SIRGAS. Además, esta información servirá para la generación de un modelo geoidal gravimétrico que contribuya a la resolución del geoides en América del Sur (Ver Figura 8).

Valores absolutos de gravedad

En enero del 2008, gracias a la colaboración entre el IGM y la National Geospatial Intelligence Agency (NGA) de los Estados Unidos se concreta el establecimiento, por primera vez en el país, de tres estaciones absolutas de gravedad (Quito, Guayaquil y Quevedo), utilizando un gravímetro absoluto A10 que tiene una

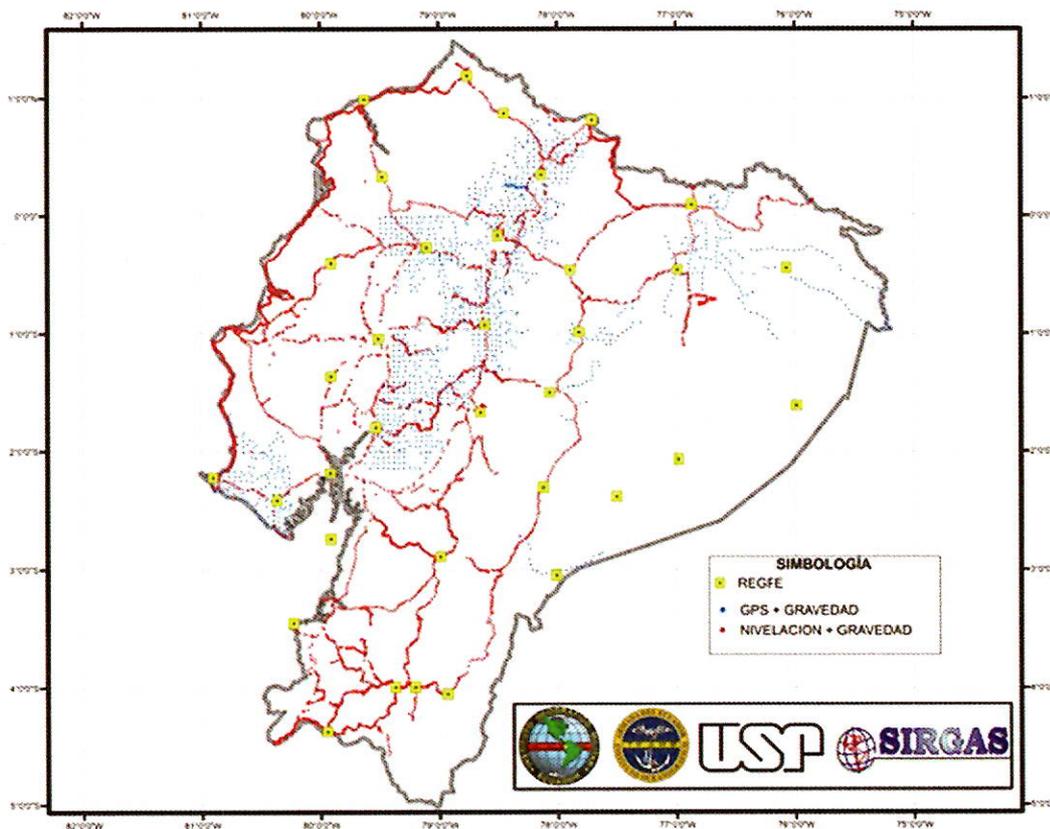


Figura 8. Densificación Gravimétrica sobre líneas de nivelación



Figura 9. Estación Absoluta Quito

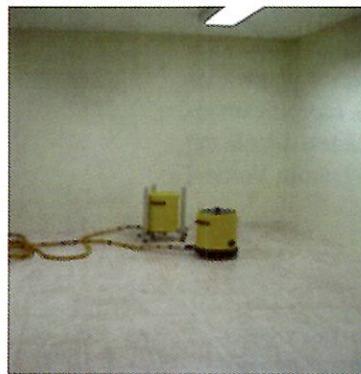


Figura 10. Estación Absoluta Guayaquil



Figura 11. Estación Absoluta Quevedo

precisión de 10 μ Gal.

Con el establecimiento de estas estaciones absolutas se tiene en el Ecuador una línea de calibración instrumental, Quito-Guayaquil, en función de la gran diferencia de altura existente entre ambas ciudades, ubicadas en la Cordillera de los Andes y la costa ecuatoriana respectivamente.

Ese mismo año, 2008, se realizó el enlace entre la nueva estación absoluta de Quito y la estación perteneciente a la Red IGSN71 del Observatorio Astronómico y comprobar la consistencia de la red implementada en el 2003, los resultados del enlace se muestran en la Tabla 1.

Como se puede observar, la diferencia entre la Red IGSN71 y el valor resultante, producto del enlace con el punto absoluto, es de 0,02 mGal, proporcionándonos una idea acerca de la consistencia del Datum gravimétrico mundial.

Sin embargo, los principales problemas de las redes de gravedad antiguas, como la IGSN71, se relacionan con su perdurabilidad y conservación en el tiempo, su fiabilidad, y la homogeneidad entre las diferentes redes observadas y calculadas en distintas épocas, razón por la que no ofrecen garantías en trabajos de precisión y control.

Hacia un nuevo datum gravimétrico

Como mencionamos anteriormente, el avance continuo de la tecnología, el apareamiento de gravímetros cada vez más precisos y los inconvenientes que presenta la red mundial nos obliga a establecer en el país nuevas redes de alta precisión determinadas con

valores absolutos de gravedad.

El valor de la gravedad absoluta se obtiene independientemente de cualquier sistema de referencia externo local, regional o global, constituyendo así medidas absolutas que conformarán las llamadas redes de orden cero. Así, en el futuro las redes de referencia de gravedad se basarán sólo en determinaciones absolutas (Boedecker 2002).

En este año, mediante un convenio interinstitucional entre el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM), el Centro de Estudios Geodésicos (CENEGEO) y la Universidad Politécnica de Sao Paulo- Brasil, se medirán aproximadamente 20 estaciones de gravedad absoluta distribuidas en el país con la finalidad de establecer un nuevo Datum gravimétrico mundial que remplace al IGSN71, este proyecto está establecido en la resolución de la Asamblea General 2015 del IAG con el análisis del Grupo de Trabajo JWG 2.1.1 “Establishment of a Global Absolute Gravity Reference System”. (Drewes, H. 2016)

Conclusiones.

Se debe realizar el ajuste de la Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador (REGFE) usando como referencia las estaciones absolutas de gravedad establecidas en el año 2008 y aplicando el método de mínimos cuadrados.

Una vez determinada la nueva red absoluta de gravedad, debe ser ajustada con la finalidad de obtener una red confiable e integral que permita el mejoramiento de los sistemas verticales de referencia.

Tabla 1. Comparación de resultados Enlace Absoluta – Red IGSN71

ESTACIÓN ABSOLUTA	ESTACIÓN RED IGSN71	VALOR AJUSTADO (mGal)	VALOR OBSERVADO (mGal)	DIFERENCIA
QUITO	32208A	977263,18	977263,16	0,02

Fuente: Flores, F. 2008

El Ecuador tiene una considerable cantidad de datos gravimétricos distribuidos en el país lo que permitirá el fortalecimiento de los proyectos planteados en el Grupo de Trabajo III de SIRGAS, específicamente en el cálculo de números geopotenciales, cálculo del modelo geoidal y la definición de un Dátum Vertical único para América del Sur.

Referencias bibliográficas

- Blitzkow, D., 2003. "Sistemas Altimétricos y Determinación del Geoide", INOCAR, Guayaquil, Ecuador.
- Boedecker, G. (2002). World gravity standards-present status and future challenges.
- Castro, C. (2005). Contribución al establecimiento de un Sistema Gravimétrico para América del Sur.
- Drewes, H. (2016). Taller SIRGAS en Sistemas Verticales de Referencia. Quito, Ecuador, noviembre 21 - 25, 2016.
- McConell, R., Winter, P., Geller, R (1977). Red Latinoamericana de Normalización de Gravedad (RELANG77).
- Mora, J. (1973). Mediciones Gravimétricas en el Ecuador. Quito
- Morelli, C. et al (1971). The International Gravity Standardization Net.
- Miranda, S., Herrada, A. y Sisterna, J. 2004. Redes de Gravedad/Nivelación. Diseño, Medición, Cálculo y Compensación de una Red Experimental Local.
- Torres, M. (2005). Metodología para el ajuste de la red gravimétrica fundamental del Ecuador Continental.

MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA LA TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS ENTRE LOS SISTEMAS DE REFERENCIA PSAD56 Y SIRGAS95, UTILIZANDO TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

Guajala, H; Zambrano, M & Leiva, C

Carrera De Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente • Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE • Sangolquí - Ecuador
Email: hggujala@gmail.com • Email: zmjsolis93@gmail.com

Resumen

La transformación de coordenadas entre los sistemas de Referencia PSAD56 y SIRGAS95, surge de la necesidad de compatibilizar la información obtenida con técnicas de posicionamiento por satélite (sistemas GNSS) que utilizan datum geocéntricos como SIRGAS, con el datum topocéntrico PSAD56, aún vigente en el Ecuador, a través de la Ley de Cartografía Nacional. El IGM como ente rector de la cartografía en el país, maneja una metodología estándar para esta transformación de coordenadas, mediante el modelo matemático de Helmert 3D y la definición de 7 parámetros (3 traslaciones, 3 rotaciones y un factor de escala). Sin embargo, ha demostrado no ser aplicable a escalas grandes, por lo cual se desarrolló la presente metodología con un enfoque estocástico, basado en técnicas geoestadísticas para la obtención de modelos de predicción espacial para las variables de desplazamiento de latitud y longitud ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$), utilizados posteriormente en la transformación de coordenadas geodésicas (ϕ , λ) entre los sistemas de referencia mencionados. Se utilizaron 149 puntos geodésicos, comunes entre los dos sistemas, destinando 107 puntos para el modelamiento con kriging ordinario puntual en el software R, paquete Rgeostats y 42 puntos para la verificación de los modelos obtenidos. Los resultados muestran que el método geoestadístico aplicado disminuye el error de transformación de (0.33 m.; 0,57 m.) al 95 % de confianza.

Palabras clave: Sistema de referencia, Transformación Helmert, Geoestadística, Kriging.

Abstract

The transformation of geographic coordinates between the PSAD56 y SIRGAS95 Reference Systems, comes from the need of matching the obtained information with positioning techniques by satellite (GNSS systems) which use geocentric data such as SIRGAS, with the PSAD56 topocentric datum, that is still in use in Ecuador on the Cartography National Law. The IGM as the main institution which administers the cartography of the country, applies a standard methodology for the geographic coordinates, by means of the Helmert 3D Maths model and the definition of these 7 parameters (3 translations and 3 rotations and a scale factor). However, it has shown that it is not possible to be at large scales. therefore, the present methodology has been developed with a stochastic approach, based on geostatistics techniques for obtaining spatial prediction models for the latitude and longitude displacement ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$), used subsequently in the geodesic coordinates transformation (ϕ , λ) between the previously mentioned systems. 149 geodesic sites were used, these both systems are in common, they destinate 107 points for the modelling with the punctual ordinary kriging in the R software, Rgeostats and 42 sites for verifying the obtained methods and the Helmert model in current use. The results show that the geo-statistical method applied, reduces the transformation error, compared to the Helmert model, obtaining an error of (0.33 m.; 0,57 m.) to the 95 % of accuracy versus an error of (1.04 m.; 1.35 m.) of the mathematic model which lies at the same accuracy level.

Keywords: Reference system, Helmert transformation, Geostatistics, Kriging.

MAPA DE UBICACIÓN DEL PROYECTO

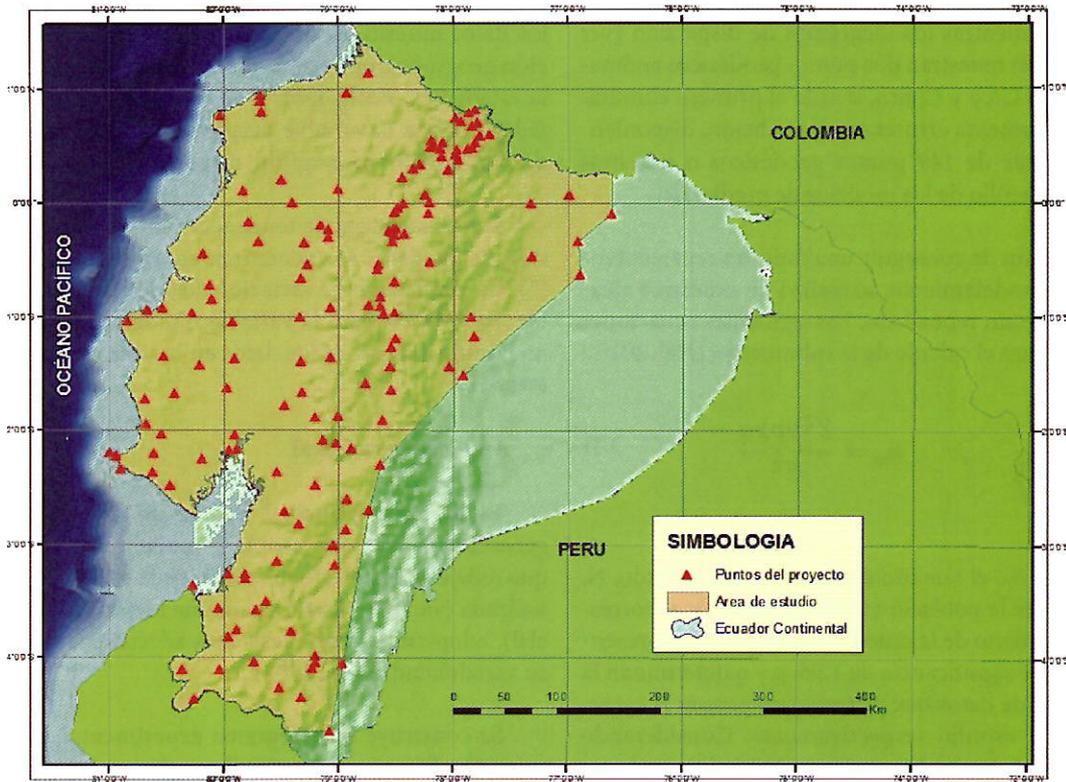


Figura 1. Mapa de Ubicación

Además, los 150 puntos geodésicos son transformados a coordenadas UTM, zona 17 Sur, en dónde se encuentra ubicado espacialmente, la mayor parte del territorio del Ecuador Continental. La razón principal para transformar las coordenadas geodésicas a UTM se debe a que el proceso geoestadístico necesita una distancia en metros para la construcción del variogra-

ma experimental, parte fundamental para la elección de un modelo de predicción adecuado.

Con la base de datos definida se realiza el análisis exploratorio de datos, mediante el uso de gráficos exploratorios, que determinan valores atípicos o anómalos que afectan al modelamiento. En primera instancia

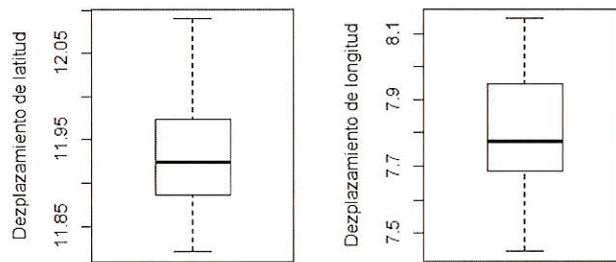


Figura 2. Diagramas de caja preliminares

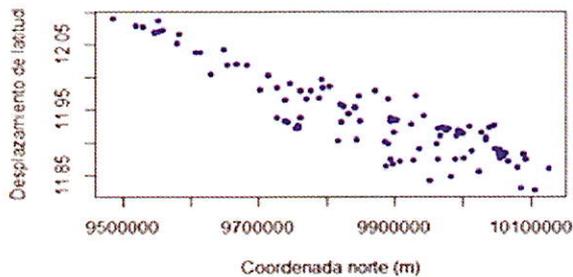


Figura 3. Diagrama de dispersión para la variable $\Delta\phi$.

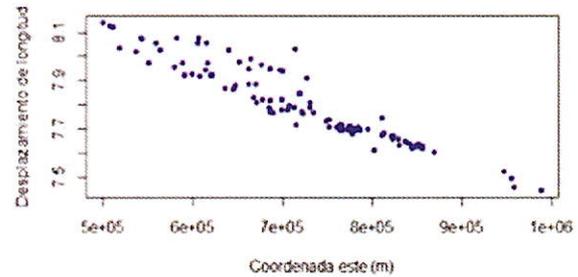


Figura 4. Diagrama de dispersión para la variable $\Delta\lambda$.

Con lo cual el variograma es representativo para la mitad de la distancia máxima de estudio, como se muestra en la Tabla 2.

con los $n-1$ valores restantes y el modelo de variograma obtenido, procediendo de igual manera para todas las muestras (Giraldo, 2005).

Tabla 2. Cálculo del tamaño de lag adecuado

Distancia de lag (m)	Número de lags	lag * n lag (m)
32000	10	320000

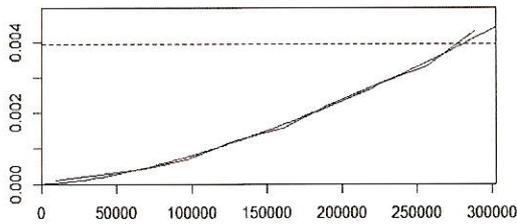


Figura 5. Modelamiento de Variograma Experimental de la variable $\Delta\phi$.

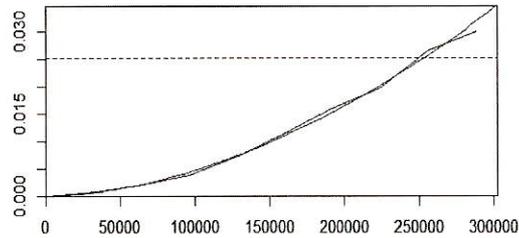


Figura 6. Modelamiento de Variograma Experimental de la variable $\Delta\lambda$.

Este modelo experimental generado esta sujeto a errores, debido en gran parte a la toma de las muestras, es así que para describir la variación espacial, se ajusta un variograma teórico al variograma experimental, por tanto el cálculo y modelamiento de los variogramas fue llevado a cabo en el Software R, paquete RGeostat®, dentro del paquete Rstudio, mediante la herramienta model.auto.

Los valores de los parámetros (meseta y alcance) para cada variograma experimental ajustado, se presentan en la Tabla 3.

Para validar el modelo elegido de acuerdo al comportamiento de la variable $\Delta\phi$ y $\Delta\lambda$, se utilizó el método de la validación cruzada, el cual consiste en sacar un punto n de la muestra, asociado a un vecindario de búsqueda (características de vecindad móvil, ver Tabla 4) y estimar el valor en ese punto usando Kriging

Predicción Espacial

La predicción se realiza mediante el método de estimación geoestadística conocido como “Kriging” o krigeado. Para esta investigación se utilizó el Kriging ordinario puntual, definido como el mejor estimador lineal insesgado. Para Luna y Araujo (2014), es lineal porque sus estimaciones son combinaciones lineales ponderadas de los datos existentes y es insesgado porque procura que la media de los errores sea nula.

Por otra parte, según Oliver (2010), en la interpolación con Kriging los valores de la propiedad por lo general se estiman en los nodos de una malla fina (grid), con una separación de 1/2 a 1/3 de la distancia media de los pares de puntos más cercanos, según lo mencionado por Meijerink et.al (1994).

Tabla 3. Parámetros para cada variograma experimental.

Variable	Modelo	Sill o meseta (") ²	Rango o alcance (m)
Desplazamiento de latitud $\Delta\phi$	Potencia	C = 0.00454	305959
Desplazamiento de longitud $\Delta\lambda$	Potencia	C = 0.0317	288044

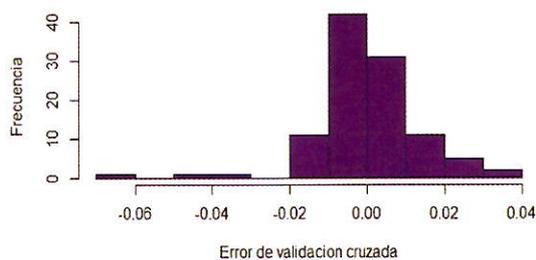


Figura 7. Histograma de Error de Validación Cruzada de la variable $\Delta\phi$.

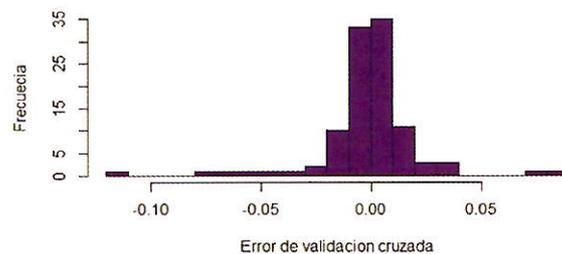


Figura 8. Histograma de Error de Validación Cruzada de la variable $\Delta\lambda$.

res. Esta medida aun así no refleja la magnitud de los errores que pueden ocurrir, para tal efecto se utiliza el valor MSE que es la suma de los residuos al cuadrado (varianza de los residuos), en donde, valores pequeños indican predicciones más precisas punto por punto.

Con los valores obtenidos en el error de transformación, es fundamental determinar una escala adecuada hasta la cual el uso de este método de transformación sea eficiente para fines cartográficos. La normativa establecida por el IGM menciona que la precisión en planimetría no debe diferir en más de 0.3 mm. por el denominador de la escala, lo cual sugiere usar este método de transformación a escalas 1:2000 y menores, con un intervalo de confianza de [0.334 m; 0.584m] al 95 %.

$$0.584/0.0003=1946.7 \approx 2000$$

$$0.3 \text{ mm} \times 2000=600 \text{ mm}=\pm 60 \text{ cm}$$

$$58 \text{ cm (máximo valor obtenido en el I.C.)} \approx 60 \text{ cm}$$

Sin embargo, es importante considerar estándares internacionales que manejen nuevos lineamientos en materia de precisión horizontal para datos planimétricos y mapas a gran escala, lo que llevó a analizar los estándares internacionales de precisión para información digital geoespacial de acuerdo a la National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) y la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS).

La ASPRS (2013) determina un valor de 0.0125 que se obtiene a partir del 1,25% del factor de escala, que es el recíproco de la relación utilizada para determinar la escala del mapa, es decir, de este valor se obtiene la precisión o la escala de las diferentes clases de datos (dependiendo de la precisión que se requiere y del nivel de detalle de los productos) en control horizontal (ASPRS, 2013). Para obtener la escala, el RMSE (raíz del error medio cuadrático) en x y y, es calculado en centímetros, y dividido para 0.0125, mientras para obtener la precisión se multiplica el 0.0125 por el factor de escala establecido, con lo cual se obtiene la escala y precisión que se puede alcanzar.

Para la presente investigación se calculó el RMSE de los 42 puntos de verificación transformados con el modelo geoestadístico, tanto para Este (x) y Norte (y) y su respectivo RMSE total; los resultados se indican en la Tabla 5:

Tabla 5. Cálculo del RMSE

	metros	centímetros
RSME _{Este}	0.4288	42.8811
RSME _{Norte}	0.4399	43.9907
RSME _{Total}	0.6143	61.4327

De acuerdo con el RMSE obtenido en x y y se calcula la escala de trabajo:

$$\left(\frac{RMSE_x (cm)}{0.0125}\right) = \frac{42.8811}{0.0125} = 3430.49 \tag{4.3}$$

$$\left(\frac{RMSE_y (cm)}{0.0125}\right) = \frac{43.9907}{0.0125} = 3519.26 \tag{4.4}$$

Se determina una escala de trabajo de 1:4000 y menores, para usar el método geoestadístico al transformar coordenadas entre Sistemas de Referencia.

Para los 42 puntos geodésicos, y un factor establecido de 2.4477 (APRS, 2013), la precisión en control horizontal al 95 % de confianza es igual

$$2.4477 * \left(\frac{RMSE_{total}}{1.4142}\right) = 1.7308(RMSE_{total}) \tag{4.5}$$

$$1.7308(61.4327) = 106.3287cm = \pm 1.06m \tag{4.6}$$

Conclusiones

Para la predicción de la variable desplazamiento de latitud, el variograma teórico que mejor se ajustó al variograma experimental fue un modelo potencia, que al elegir características de vecindad móvil para el predictor de kriging, se obtuvo que la mayor parte de errores de predicción en la validación cruzada se encuentra en el intervalo de [-0.6 m.; 0.6 m.]. Además, el modelo obtenido para la desviación estándar del error de predicción de la variable ($\Delta\phi$) determinó un error máximo de predicción de 1.32 m., al 95% de confianza.

Para la predicción de la variable desplazamiento de longitud, el variograma teórico que mejor se ajustó al variograma experimental fue un modelo potencia, que al elegir características de vecindad móvil para el predictor kriging, se obtuvo que la mayor parte de errores de predicción en la validación cruzada se encuentra en el intervalo de [-1.5 m.; 1.5 m.]. Además, el modelo obtenido para la desviación estándar del error de predicción de la variable ($\Delta\lambda$) determinó un error máximo de predicción de 2.12 m, al 95% de confianza.

Al analizar los estadísticos descriptivos obtenidos al utilizar esta metodología en los 42 puntos de verificación, se comprobó que el método geoestadístico disminuye el error de transformación de coordenadas entre sistemas de referencia, determinando un intervalo de confianza al 95% de [0.327 m.; 0,567 m.]

GeoScope-Velocity: CALCULADORA GEODÉSICA PARA DISPOSITIVOS MÓVILES EN ANDROID STUDIO

Ayala, L¹; Tierra, A^{1,2}; Luna, M^{1,2}; Staller, A³; Benito, M.B³ & M. Gaspar³

¹Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente • Universidad de las Fuerzas Armadas-Espe • Sangolquí - Ecuador

²Grupo de Investigación Geoespacial • Universidad de las Fuerzas Armadas-Espe • Sangolquí - Ecuador

³Dpto. Ingeniería Topográfica y Cartografía, Euit Topografía • Universidad Politécnica de Madrid • España.

Email: Alexlisz1.1.1@gmail.com; Email: Atierra@Espe.Edu.Ec

Resumen

En la actualidad el uso constante de dispositivos móviles ha convertido a estos en herramientas necesarias a la hora de realizar cualquier trabajo de forma ágil y práctica debido a su rapidez, simplicidad de manejo y movilidad. El desarrollo de aplicaciones para dichos dispositivos se ha profundizado con la intención de llevarlo más allá del uso recreativo hasta el campo de la ingeniería. De esta manera, en este trabajo se presenta una calculadora geodésica llamada Geoscope-Velocity, la misma que permite transformar coordenadas a diferentes épocas para el Ecuador continental, a partir de un dispositivo móvil. Para el desarrollo de esta calculadora se determinó primeramente las velocidades de las estaciones de monitoreo continuo de la red SIRGAS-Ecuador. A partir de la estructuración de un programa en lenguaje JAVA, mediante la utilización de software libre se llevó a cabo la transformación de coordenadas de una época t_i a una época t_f deseada, permitiendo el ingreso de coordenadas cartesianas o geodésicas. En ambos casos se calcula el tipo de coordenadas que el usuario prefiera ya sea cartesianas, geodésicas o UTM, las cuales finalmente se obtienen con una precisión al milímetro. Dichas soluciones se calculan con las velocidades v_x , v_y , v_z tomadas del modelo calculado para el Ecuador antes del sismo ocurrido en 16 de Abril del 2016. Para la generación de la malla de velocidades se utilizó la técnica kriging cuyo enfoque geoestadístico se basó en los datos para identificar las características espaciales mediante el examen de las observaciones por pares. La característica distintiva es que minimiza la varianza del error de predicción y la suma de los pesos utilizados es igual a la unidad, esto lo realiza para que la esperanza del predictor sea igual a la esperanza de la variable, cumpliendo así el requisito de insesgamiento, el cálculo se lo realizó en una malla de 15'x15'. La plataforma utilizada para la realización de la presente aplicación GeoScope-Velocity, fue Android Studio versión 1.2.1.1 con la utilización de la metodología de programación orientada a objetos. Esta aplicación se puede utilizar en cualquier dispositivo móvil que cuente con versiones de Android 4.0.3 en adelante.

Palabras Clave: Android, dispositivo móvil, velocidades, SIRGAS

Abstract

Nowadays the continued use of mobile device has turned these into necessary tools at the moment to realize any work of agile and practical form due to his rapidity, simplicity of managing and mobility. The development of applications for those devices has been deepened with the intention of taking it beyond the recreational use up the field of the engineering. In this way, in this work presents a geodesic calculator called Geoscope-Velocity, the same one that it allows to transform coordinates to different periods of time for continental Ecuador, from a mobile device. For the development of this calculator one determined first the speeds of the stations of constant monitoring of network SIRGAS-Ecuador. From the structure of a program in language JAVA, through the use of free software carried out the transformation of coordinates of an epoch t_i to an epoch t_f wished, allowing to insert of Cartesian or geodesic coordinates. In both cases there is calculated the type of coordinates that the user prefers already be Cartesian, geodesic or UTM, wich finally are obtained by a precision of milimeter. Those solutions are calculated by the speeds v_x , v_y , v_z taken of the calculated model for Ecuador before the earthquake hapenned on April 16, 2016. For the generation of speed mesh the technology was used kriging whose geostatistical approach was based on the information to identify the spatial characteristics by means of the examination of the observations for couples. The distinctive characteristic is to minimize the variance of the mistakes of prediction and the sum of the used weight is equal to the unit, this realices it in order that the hope of the predictor is equal to the hope of the variable, thereby fulfilling the requirement of nonbiased, the calculation realized it in a mesh of 15'x15'. The platform used for the accomplishment of this application GeoScope-Velocity, was Android Studio version 1.2.1.1 with the use of the methodology of programming orientated to objects. This application can be used in any mobile device that possesses Android's versions 4.0.3 in forward.

Keywords: Android, mobile device, velocities, SIRGAS

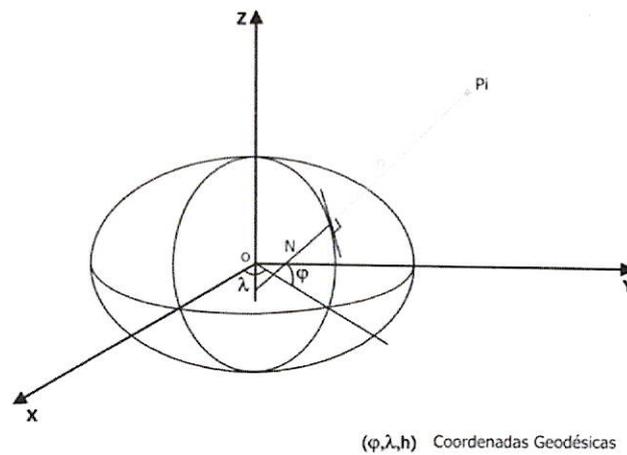


Figura 1. Sistema de coordenadas geodésicas
Fuente: (Leiva, 2003)

Coordenadas cartesianas

Sistema de coordenadas cuyo origen se encuentra en el centro de masas terrestre, donde el eje Z coincide con el eje de rotación de la Tierra, el eje X se encuentra orientado al meridiano de Greenwich y el eje Y es perpendicular a los otros dos formando un sistema ortogonal derecho (Figura 2). Este sistema de coordenadas es uno de los sistemas más utilizados en Geodesia y su unidad de medida es métrica (Drewes H. , 2014).

Coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM)

Es un sistema de coordenadas planas basadas en la proyección cartográfica Transversa de Mercator, la proyección UTM se encuentra delimitada por paralelos y meridianos. Los paralelos son 60 bandas verticales de 6° cada una, las cuales empiezan desde el meridiano de Greenwich y siguen avanzando hacia la derecha. Los paralelos son bandas horizontales de 8° que llegan hasta 80° hacia el sur y 84° hacia el norte partiendo del Ecuador. Esta proyección utiliza el mó-

dulo de deformación 0,9996 para el meridiano central de cada zona, cuyo origen es un punto que toma un valor de 500000m E y 0m N en el hemisferio norte o un valor de 500000m E y 10000000m S en el hemisferio sur. Las coordenadas UTM se designan con el valor de la abscisa llamada Norte (N), la ordenada identificada como Este (E) y el número de la zona junto al hemisferio al cual pertenezca el punto que se va a representar (Hernández López, 1979).

Transformación de coordenadas geodésicas-cartesianas

Según Caviedes (2011) para la formulación del algoritmo en la transformación de coordenadas geodésicas a cartesianas las fórmulas utilizadas fueron las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$X = (N + h) * \cos(\varphi) * \cos(\lambda) \quad 1)$$

$$Y = (N + h) * \cos(\varphi) * \sen(\lambda) \quad 2)$$

$$Z = \left(N * \left(\frac{b^2}{a^2} \right) + h \right) * \sen(\varphi) \quad 3)$$

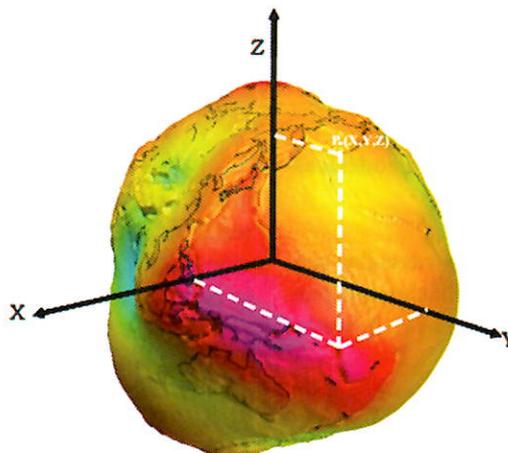


Figura 2. Sistema de coordenadas cartesianas
Fuente: (FURONES, 2011)

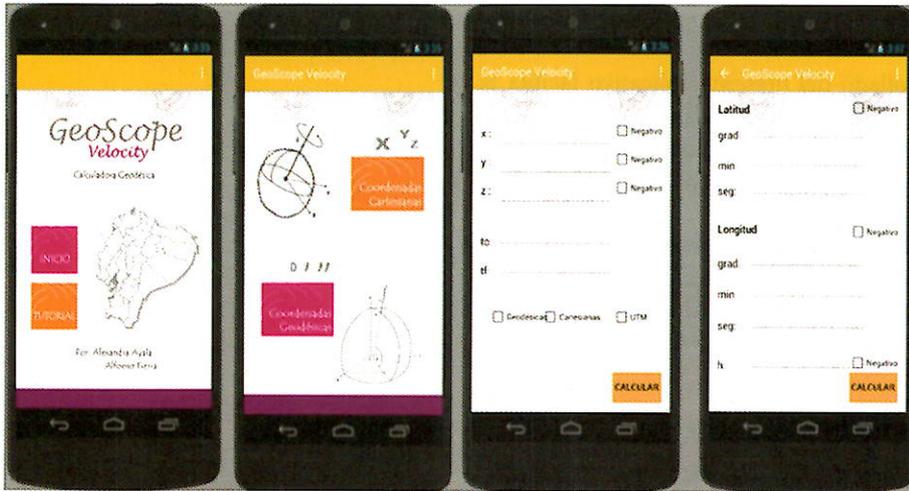


Figura 3. Interfaz de la aplicación GeoScope-Velocity

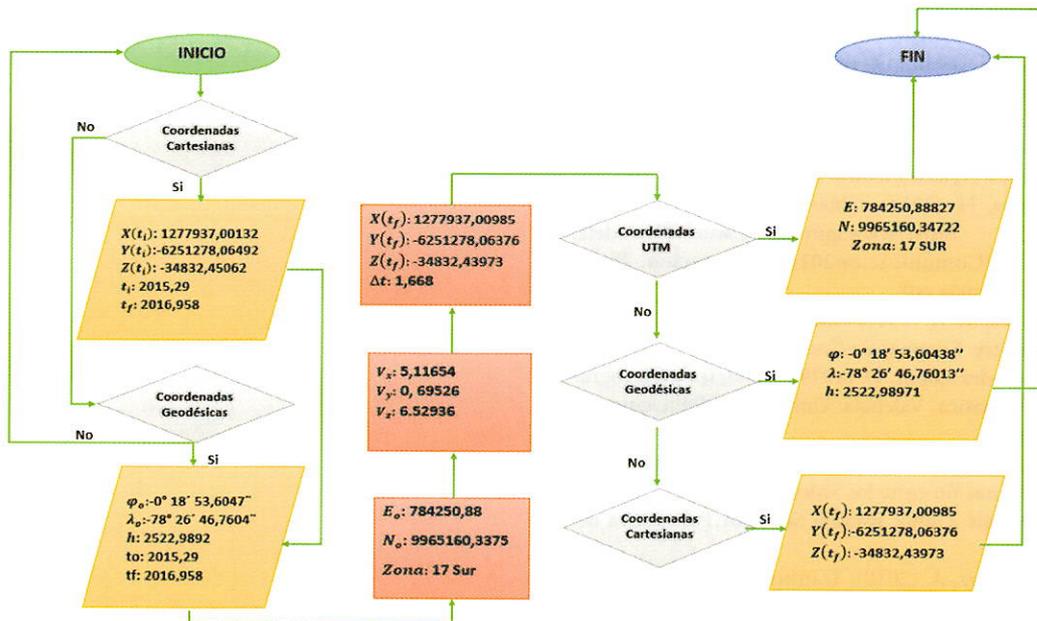
La primera vista es la que vincula a las demás funciones de la aplicación, tal sea una vista rápida a un sencillo tutorial brindando al usuario una breve descripción de las características y especificaciones de la calculadora. A esta misma vista, la de la pantalla “inicio”, se encuentra vinculada la indicada de seleccionar el tipo de coordenadas de ingreso y salida, mismas que se obtuvieron después de haber sido calculadas sus velocidades respectivas, tomadas del modelo de velocidades para el Ecuador, con las épocas t_i y t_f ingresadas por el usuario.

Resultados

Al ingresar a la pantalla de inicio el usuario tiene dos opciones como se observa en la Figura 3 ya sea de acceder a un tutorial rápido que ayuda de guía para la utilización de la aplicación o caso contrario de no presentar inconvenientes se empieza a correrla con el bo-

tón inicio como se observa en el Esquema 1, el cual lo lleva la siguiente pantalla “Menú” con las dos opciones de ingreso de coordenadas, cartesianas o geodésicas. En ambas opciones de ingreso se pide las épocas t_i y t_f donde finalmente se selecciona el tipo de coordenadas de salida.

La verificación de los resultados obtenidos con la aplicación GeoScope-Velocity se realizaron pruebas con coordenadas de la red GNSS de monitoreo continuo para el Ecuador (REGME), tomada del geoportall IGM, transformándolas de cartesianas a geodésicas, de geodésicas a cartesianas y de cartesianas a UTM para ambas opciones de ingreso de datos. Para coordenadas geodésicas la aplicación GeoScope-Velocity trabaja con el elipsoide GRS80.



Esquema 1. Diagrama de flujo del proceso del aplicativo

CÁLCULO DE COORDENADAS USANDO EL MÉTODO PRECISE POINT POSITIONING –PPP ESTÁTICO MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE RTKLIB

Albán, M¹; Romero, R² & Tierra, A³

¹Carrera de Ingeniería Geográfica • Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE • Sangolquí - Ecuador

²Gestión de Investigación y Desarrollo • Instituto Geográfico Militar • Quito - Ecuador

³Grupo de Investigación Geoespacial • Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE • Sangolquí - Ecuador

Email: artierra@espe.edu.ec; Email: mfalban@espe.edu.ec; Email: rvromeroc@outlook.com

Resumen

Existen diferentes factores que degradan la precisión de la señal GPS desde su emisión del satélite hasta llegar al receptor. Generalmente, para minimizar esta degradación y obtener la posición de un punto con buena precisión es común realizar métodos relativos de posicionamiento. Con el posicionamiento absoluto, la incertidumbre está en el orden de metros, pero actualmente es posible mejorarla con el método PPP (Precise Point Positioning). Actualmente la técnica PPP es capaz de modelar los factores que influyen en su precisión como son la ionósfera y tropósfera, además de las correcciones de órbitas, relojes, entre otras. El objetivo del presente proyecto es analizar las diferencias de las coordenadas cartesianas (X, Y, Z) obtenidas mediante el método estático PPP utilizando el software libre RTKLIB v2.4.2, con las coordenadas semanales SIRGAS oficiales, y determinar la magnitud de su desplazamiento, a fin de establecer un criterio para trabajos prácticos de posicionamiento. Para ello, se ha utilizado los archivos RINEX de las estaciones monitoreo continuo de la REGME pertenecientes a la red SIRGAS-CON, con observaciones a intervalos de grabación de 1 y 30 segundos. El procesamiento se realizó en tiempos diferentes desde 30 segundos hasta 24 horas, tanto en la mañana como en la tarde, aplicando el modelo ionosférico "Ion Free LC", modelo Troposférico "Estimate ZTD" y resolución de ambigüedades por el modo "Fix and Hold". Además, se realizaron pruebas utilizando efemérides precisas finales, rápidas y ultra-rápidas publicadas por la IGS. Mediante la comparación de las coordenadas semanales de SIRGAS se determinó que la solución de las coordenadas de la técnica PPP depende del tiempo y hora de rastreo. Los resultados indican que, para tener errores en la posición de un punto, menores a 1m, 50 cm, 30 cm, 20cm usando efemérides ultra rápidas, necesito un tiempo de rastreo mínimo de 4, 10, 15, 35 minutos, respectivamente; mientras que usando las rápidas o finales necesito 2, 7, 10, 20 minutos, respectivamente. Se evidenció también, que no existen diferencias significativas al utilizar efemérides precisas y rápidas en el procesamiento, lo que no sucede con las efemérides ultra rápidas.

Palabras clave: PPP Estático, RTKLIB, SIRGAS, Posicionamiento, IGS.

Abstract

There are many factors that degrade GPS- signal tracking since its broadcast from satellite to receiver. Generally, in order to minimize the signal degradation, and get the best accuracy upon a point, relative positioning methods are common. Using absolute positioning, uncertainty is into meter level accuracy, but nowadays is possible to enhance it with PPP (Precise Point Positioning) method. At present PPP is able to model factors that affect accuracy such as ionosphere and troposphere, including orbits and clocks correction among other. This project is aimed to analyze the differences of Cartesian coordinates (X, Y, Z) obtained from Static-PPP method using RTKlib v2.4.2 open source software and official weekly coordinates from SIRGAS solution, to establish a criterion towards standalone positioning. For that, it was used RINEX files from permanent stations belonging REGME included in SIRGAS-CON network, samplings of tracking were 1 and 30 seconds. Processing was carried out with different intervals since 30 seconds until 24 hours, both morning and afternoon. It was applied ionospheric model "Ion Free LC", tropospheric model "Estimate ZTD" and ambiguity resolution "Fix and Hold". Also, the processing was performed with precise, rapid and ultra-rapid ephemerides released by IGS. Trough comparison with weekly coordinates from SIRGAS solution, it was determined that, coordinates calculated from PPP method depend directly on time and parts of the day. Results denoted that to achieve errors in a point less than 1m, 50cm, 30cm and 20cm using ultra-rapids ephemerides it is necessary a minimum tracking of 4, 10, 15 and 35 minutes respectively, while using rapids or finals ephemerides, it is required 2, 7, 10 and 20 minutes respectively. Moreover, it was denoted, there is no significant differences between processing with precise and rapids ephemerides, which does not happen with ultra-rapid ephemeris.

Keywords: Static PPP, RTKLIB, SIRGAS, Positioning, IGS

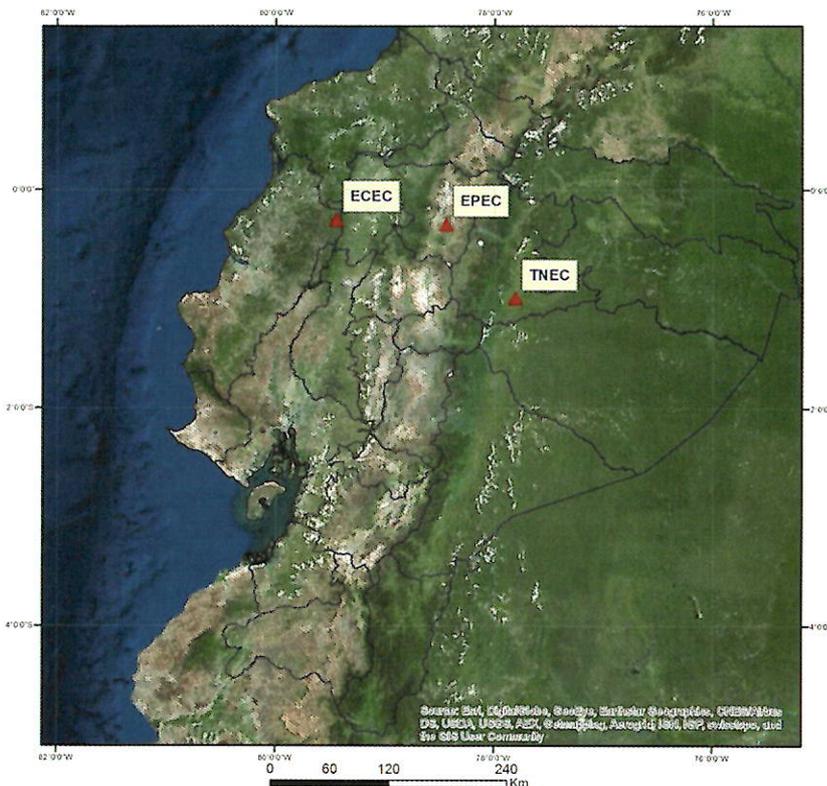


Imagen 1. Mapa de ubicación de las estaciones utilizadas

usuario se observa en la Imagen 2. Después de realizar algunas pruebas, se determinó para el procesamiento la aplicación del modelo ionosférico “Ion Free LC”, corrección de mareas terrestres “Solid/OTL”, modelo Troposférico “Estimate ZTD”, máscara de elevación de 15° y resolución de ambigüedades por el modo “Fix and Hold” (Tomoji, 2013). (Ver Imagen 3)

Además, se ha considerado varias correcciones generadas por los centros de análisis de la IGS, obtenidas mediante el portal web de la CDDIS (Crustal Dy-

namics Data Information System) como son: archivos de órbita (.sp3), parámetros ionosféricos (.i) y parámetros de rotación de la tierra (.erp). El archivo de cargas oceánicas (.blq) fue obtenido de la OSO (Onsala Space Observatory). Las correcciones de antenas satelital (.atx) y de receptor fueron obtenidas de la página web de la IGS y de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) respectivamente. Finalmente, mediante la aplicación RTKGET se obtuvieron las correcciones de reloj (.clk), generadas por la IGS de igual manera.

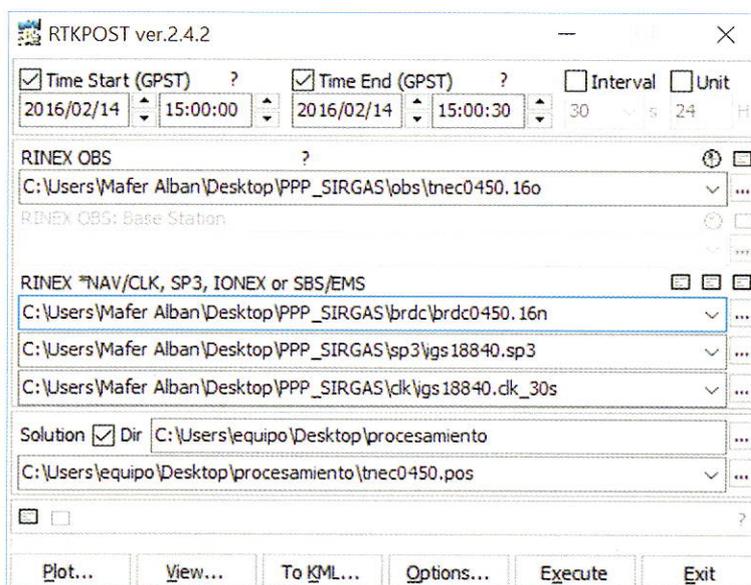


Imagen 2. RTKPOST

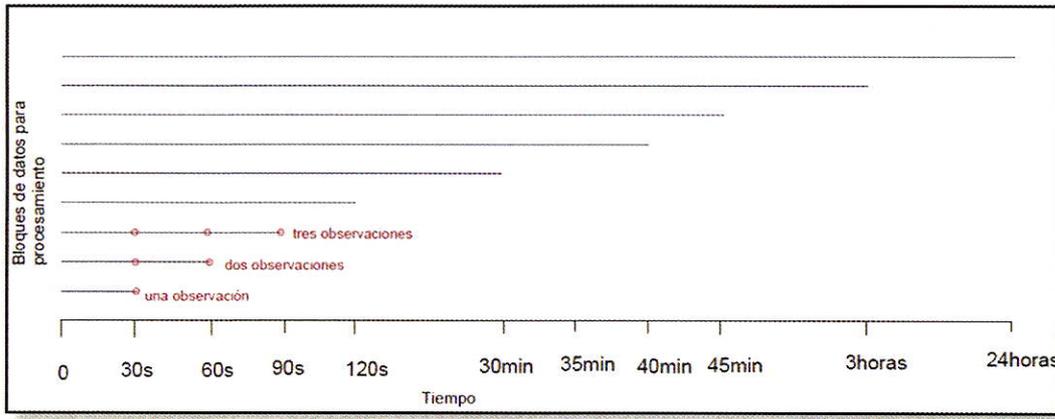


Figura 2. Bloques de datos para procesamiento de archivos RINEX con observaciones a intervalos de grabación de 30 segundos.

(error) obtenida con PPP. En la Figura 3, se observan dos curvas procedentes del procesamiento con observaciones tomadas cada segundo y cada 30 segundos. En este caso, solo se muestra el resultado utilizando efemérides precisas rápidas y el rastreo realizado a horas de la mañana.

En la misma Figura 3, se observa que las coordenadas obtenidas del procesamiento de observaciones a intervalos de grabación de 30 segundos presentaron resultados con menor error, con diferencias en el orden de los decímetros.

La página de la IGS indica que los intervalos de las correcciones orbitales están dadas cada 15 minutos, mientras que las correcciones de los relojes de los satélites cada 30 segundos y 5 minutos, para productos finales y cada 5 minutos para productos rápidos. Relacionándolo con los resultados obtenidos en la Figura 3, resulta en que para frecuencias de observaciones altas (cada segundo) quedan demasiados datos sin corregir.

La Figura 4 muestra un gráfico de tiempo de ras-

treo vs error en distancia (metros), para procesamientos realizados a horas de la mañana (9 am) y tarde (3 pm) en tiempo local. Considerar que se está utilizando archivos RINEX a intervalos de grabación de 30 segundos, que fueron los que presentaron mejores resultados de acuerdo a la primera comparación, utilizando en este caso efemérides rápidas.

Como se observa en la Figura 4, el error en distancia de las coordenadas obtenidas a horas de la mañana es menor respecto a las tomadas en la tarde.

Finalmente, en la Figura 5 se presenta la gráfica de la variación de los resultados con la utilización de efemérides precisas finales, rápidas y ultra-rápidas; y en la Figura 6 una ampliación en una ventana desde los 10 minutos hasta las 24 horas, realizada con fines de visualización. Todo esto aplicando la metodología determinada y bajo los mejores condicionamientos establecidos: RINEX a intervalos de grabación de 30 segundos y rastreo obtenido a horas de la mañana en tiempo local.

En las Figuras 5 y 6 se evidencia que no existen

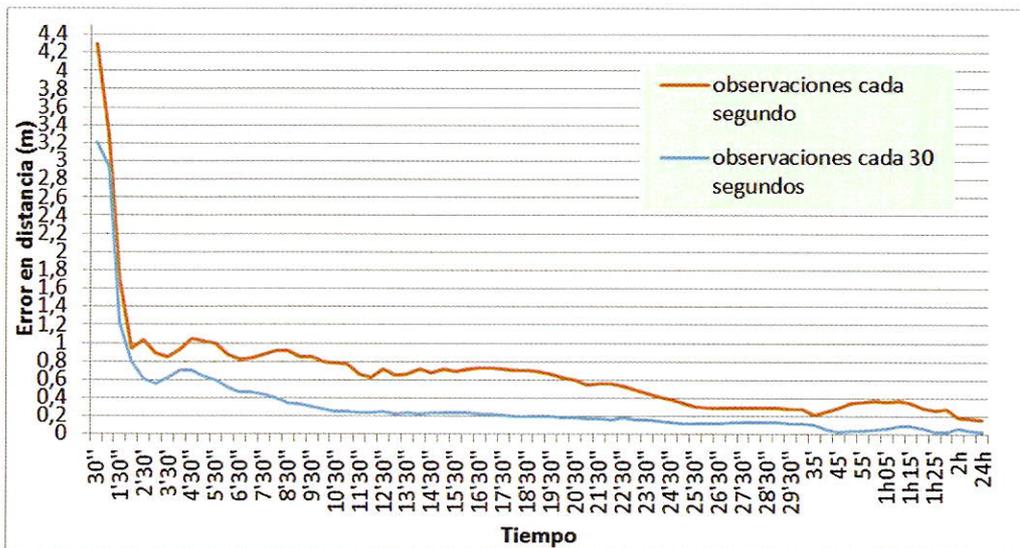


Figura 3. Error en distancia obtenido del procesamiento de observaciones a intervalos de grabación de 1 y 30 segundos.

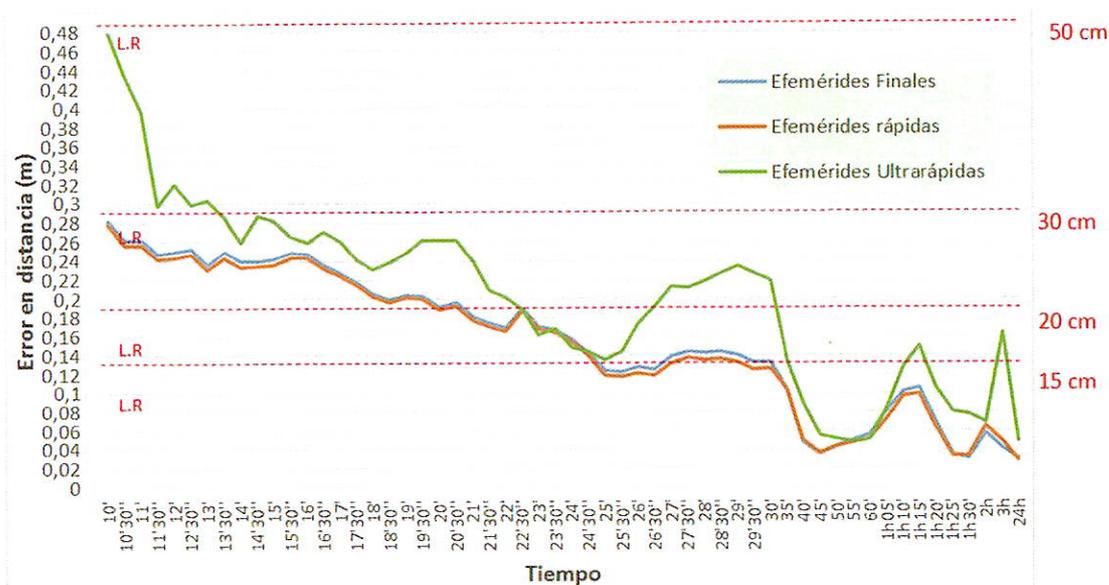


Figura 6. Error en distancia de las soluciones obtenidas con efemérides finales, rápidas y ultra-rápidas (Ventana de 10 minutos a 24 horas). Se incluye líneas de referencia punteadas en rojo (L.R) para precisiones de 15, 20, 30 y 50 cm.

El Posicionamiento Puntual Preciso depende del tiempo y hora de rastreo, intervalo de grabación de las observaciones, modelos de corrección y productos utilizados.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Geográfico Militar- IGM por los datos de las Estaciones de Monitoreo Continuo entregadas para el desarrollo de este proyecto.

Referencias Bibliográficas

- Anquela, A., Martín, A., Berné, J., & Padín, J. (2013). GPS and GLONASS Static and Kinematic PPP Results. *J. Surv. Eng.*
- Capilla, R. (2015). Aportaciones al estudio de la capacidad de los modelos conceptuales en posicionamiento absoluto preciso (precise point positioning) para tiempo real a través del análisis del rendimiento de productos y prototipos en un escenario multi-constelación GNSS. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Chen, W., Hu, C., Li, Z., Chen, Y., Ding, X., Gao, S., y otros. (2004). Kinematic GPS Precise Point Positioning for Sea Level Monitoring with GPS Buoy. *Positioning*, Vol. 1 No. 8.
- Dawidowicz, K., & Krzan, G. (2014). Coordinate estimation accuracy of static precise point positioning using on-line PPP service, a case study. Budapest: Springer Netherlands.
- Guo, Q. (2015). Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation. *GPS Solut.*
- Héroux, P., Gao, Y., Kouba, J., Lahaye, F., & Mireaul, Y. (2004). Products and Applications for Precise Point Positioning - Moving Towards. Long Beach: Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004).
- Huber, K., Heuberger, F., & Abart, C. (2010). PPP: Precise Point Positioning – Constraints and Opportunities. Sydney.
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. GPS Solutions.
- Mendez, J. (2015). Método alternativo para georeferenciación de información en el sistema de coordenadas MAGNA- SIRGAS. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Paredes, M. (2013). Proceamiento PPP de observaciones GNSS utilizando el software libre RTKLIB. Santiago: Universidad de Santiago de Chile.
- Rodríguez, I., Rodríguez, G., Madicella, S., Herraiz, M., Ciraolo, L., Moreno, B., y otros. (2016). Análisis de la relación entre las variaciones del contenido de electrones ionosférico (ROT) y el error en el Posicionamiento Puntual Preciso PPP. Madrid.
- Tomoji, T. (2013). RTKLIB ver.2.4.2 Manual.
- Wang, L., Zhang, Q., Huang, G., & Zhang, C. (2014). Experiment results and analysis of landslide monitoring by using GPS PPP technology. China: Yantu Lixu

Introducción

Los sistemas de posicionamiento diferencial GNSS (Global Navigation Satellital System) a tiempo real han tenido un gran desarrollo en las últimas décadas. Las técnicas diferenciales RTK y DGPS, han permitido aumentar la precisión del posicionamiento a tiempo real, en base a una red de receptores GNSS situados en puntos de coordenadas conocidas, procesando los observables y evaluando los errores del reloj y de la trayectoria del satélite así como los retardos ionosféricos y troposféricos que sufre la señal. Sin embargo, el estudio e implementación de un sistema de posicionamiento diferencial RT (Real Time) requiere distintos elementos, que influyen directamente a la hora de evaluar las posibilidades y aplicaciones susceptibles de ser desarrolladas en cada ámbito [Berne et al., 2005].

Uno de los factores más limitantes del posicionamiento diferencial a tiempo real, es la distancia que separa al receptor base del remoto. Los errores ocasionados en las señales GNSS por la atmósfera de la Tierra, tiene una correlación espacial que se diluye a medida que aumenta la separación base – remoto [Raman and Garin, 2005]. El envío de correcciones diferenciales comenzó a realizarse a través de enlaces de comunicación por medio de radio transmisores, con tecnologías UHF y VHF principalmente. Pero la debilidad del enlace, limitante en la distancia base-remoto, produjo que estas técnicas no fuesen ampliamente utilizadas. Por otra parte, la no estandarización de los mensajes de corrección que emiten las estaciones bases, no hacía posible la utilización de estas técnicas con receptores de distintas marcas.

Para solucionar estos inconvenientes, surgieron las nuevas tecnologías asociadas al posicionamiento GNSS. En primera instancia con la estandarización del formato de transmisión de datos y correcciones a través del mensaje RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) y luego, con el avance en las aplicaciones de Internet, se dio paso a la creación del protocolo NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) y su utilización tanto para el posicionamiento DGPS (código) como para RTK (fase). Es decir, las técnicas de posicionamiento son las mismas (DGPS- RTK) pero cambia el formato y el medio de transmisión.

Otra mejora significativa a lo largo de la última década ha sido la capacidad de predecir las órbitas de los satélites GNSS y el estado de sus relojes. Un factor decisivo para lograr esas mejoras fue el despliegue, bajo la coordinación del International GNSS Service (IGS), de una red global de rastreo con alrededor de cien estaciones GNSS que proporcionan datos RT.

La disponibilidad de órbitas y relojes precisos en

tiempo real ha movilizado el desarrollo de técnicas basadas en el posicionamiento puntual preciso (PPP) en tiempo real, en contraposición con el posicionamiento diferencial. Ya no es necesario que un receptor base genere y transmita al remoto la información requerida por el método diferencial. En su lugar, un servidor transmite al receptor remoto las órbitas y los relojes precisos requeridos por el método PPP [Bisnath and Gao, 2009].

Por lo tanto, empleando la misma tecnología, es posible hablar de una nueva técnica de posicionamiento que denominaremos PPP-NTRIP, ya que la transmisión también se realiza a través del protocolo NTRIP, y en el formato estándar RTCM, de allí la importancia de entender en detalles estas nuevas tecnologías.

Para poder obtener la posición de un observador corregida mediante PPP-NTRIP, se necesitan entonces tres flujos de datos o “streams”. Por un lado, las efemérides de los satélites, las correcciones a dichas órbitas y relojes y las propias observaciones del receptor en cuestión a corregir.

El International GNSS Service (IGS), ofrece diversos productos para este fin, siendo los más utilizados las efemérides transmitidas (EPH3RTCM) y las correcciones a dichas efemérides (IGS03) que corresponden a una combinación de soluciones individuales calculadas por los centros de análisis del IGS.

Las observaciones de las estaciones están disponibles, ya que existe una amplia red de estaciones GNSS permanentes que realizan la transmisión online de los datos observados en forma continua e ininterrumpida, mediante el mismo protocolo NTRIP. Todos estos flujos de datos se combinan mediante un programa de cálculo PPP, para obtener las posiciones corregidas época a época.

Por lo tanto, con la infraestructura actual, es posible utilizar la técnica PPP para monitorear el comportamiento geodinámico de los sitios donde se encuentran emplazadas las estaciones GNSS permanentes, ya que se puede conocer la posición corregida de las mismas, instante a instante.

Existen numerosos antecedentes de la utilización de redes GNSS a tiempo real en aplicaciones geodinámicas, como por ejemplo para la estimación de magnitudes sísmicas, localización de epicentros y mecanismos focales en regiones geodinámicamente muy activas.

Japón es el país con mayor avance en esta temática. Posee una red muy densificada de estaciones sísmológicas y GNSS combinadas. En el Sismo Chuetsu-Nigata ocurrido en 2007 de magnitud 6.5, se han podido observar desplazamientos de hasta 40 cm en estaciones ubicadas a 20 km del epicentro. Y se ha podido ob-

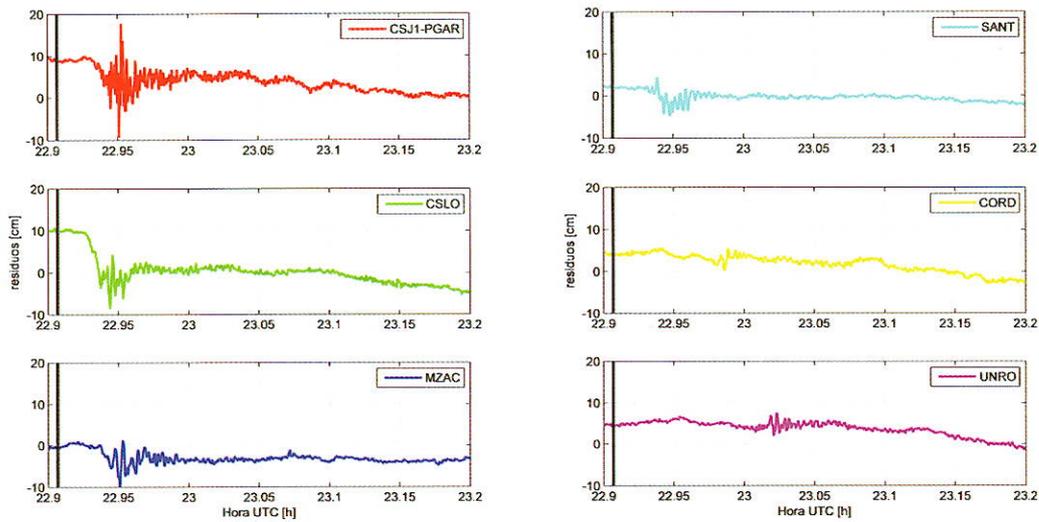


Figura 1. Desplazamientos ESTE producidos por el terremoto

sísmico) del orden de 10 cm hacia el oeste (Figura 1).

En la Figura 1 se observa que el movimiento ocurre en distintos momentos, debido a la distancia relativa de cada estación respecto al epicentro. Además de observarse como disminuye la amplitud del desplazamiento en las coordenadas a medida que aumenta dicha distancia. Los mayores saltos se observan en la componente este, debido a la naturaleza y ubicación de la falla de subducción donde se produjo el sismo.

Posteriormente se amplió el estudio a una cantidad mayor de estaciones, intentando analizar la velocidad y el momento de llegada de la onda sísmica en distintas direcciones (Figura 2)

Se contabilizó el retardo o demora en percibirse el movimiento sísmico en cada estación, desde el momento de ocurrencia del terremoto. La Figura 3 muestra el retardo en la llegada de la primera onda

sísmica percibida en cada sitio, aumentando en forma proporcional con la distancia al epicentro.

Analizando el momento cuando se produce el desplazamiento debido al terremoto en cada estación y la distancia respecto al epicentro, se pudieron estimar también las velocidades de propagación de la onda sísmica tal como se muestra en la Tabla 1.

A su vez, al observar los residuos entre posiciones sucesivas (diferencias de cada coordenada con su inmediata anterior), se observó el desplazamiento neto durante el evento. En la Figura 4, se muestra el movimiento instantáneo de la estación argentina CSJ1, localizada en la provincia de San Juan, asemejándose a las gráficas de un sismógrafo.

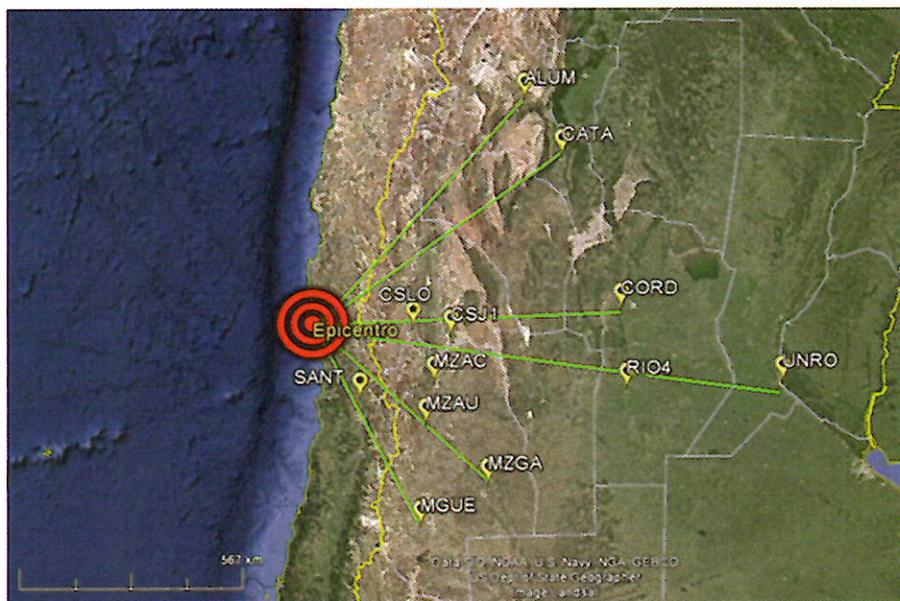


Figura 2. Localización del epicentro, estaciones GNSS analizadas, ubicadas en diferentes direcciones.

zar con PPP, en modo pos-proceso, segundo a segundo el comportamiento de sus coordenadas.

Referencias

- Allen Richard M. and Ziv Alon. "Application of real-time GPS to earthquake early warning". Geophysical Research Letters, 2011.
- Berne, J.L.; Gomez, D.; Grau J.; Quintanilla, I. (2005) "Estudio y aplicaciones de servicios de posicionamiento/navegación RTK basado en IP". 6a Setmana Geomàtica de Barcelona. Dept. d'Enginyeria Cartogràfica, Geodèsia i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València, València
- Bisnath, S., Gao, Y. (2009) Precise Point Positioning, GPS World.
- Camisay M.F., Mackern M.V., Mateo M.L., Robin A.M. Monitoreo satelital a tiempo real con fines geodinámicos, enviado a GEOACTA, Argentina, enero 2017.
- Larson K., "GPS Seismology". Journal of Geodesy, 2008.
- Laurichesse D., Mercier F., Berthias J.P. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results. ION GNSS 2010, September 21-24, 2010 - Portland, Oregon.
- Raman S, Garin L (2005) Performance Evaluation of Global Differential GPS (GDGPS) for Single Frequency C/A Code Receivers, ION GNSS 2005, Long Beach, CA, USA, Sept. 2005.

Introducción

De acuerdo con lo discutido por renombrados geodestas como Hofmann-Wellenhof y Moritz (2006), Torge y Müller (2012) y Gemael (2012), el objetivo primordial de la Geodesia es determinar la forma y la dimensión de la Tierra, así como del campo de la gravedad en su exterior. Desde el inicio de la era espacial, a mediados de los 60, esta tarea ha sido conducida con éxito por medio de observaciones de las perturbaciones en las órbitas de los satélites. Estas perturbaciones son inducidas por el efecto gravitacional de heterogeneidades de masas relativamente a una distribución esférica homogénea, generando informaciones de las anomalías relacionadas a las características de longitudes de onda largas y medianas de este campo. Estas informaciones, junto con el potencial centrífugo, hacen posible el establecimiento de Modelos Globales del Geopotencial – MGG (Melo, 2011).

Los MGG son establecidos a partir de un conjunto de coeficientes del desarrollo del potencial gravitacional en serie de funciones armónicas esféricas. La expresión fundamental del desarrollo del geopotencial en armónicos esféricos es presentada en la ecuación 1, adaptada de Gemael (2012), en la que φ representa la latitud del punto de cálculo, λ representa la longitud del punto de cálculo, r es la distancia del punto de cálculo al geocentro del modelo, a es el semieje mayor del elipsoide asociado al modelo, ω es la velocidad angular, $C_{n,m}$ y $S_{n,m}$ son los coeficientes del desarrollo en series, GM es la constante gravitacional geocéntrica asociada al modelo, $P_{n,m}$ representa las funciones de Legendre y W es el geopotencial.

$$\begin{aligned}
 W(\varphi, \lambda, r) & \\
 &= \frac{GM}{r} \left[1 \right. \\
 &+ \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n (C_{m,n} \cos m\lambda \\
 &\left. + S_{m,n} \sin m\lambda) \right] P_{nm}(\sin\varphi) + \frac{1}{3} \omega^2 r^2 [1 - P_{20}(\sin\varphi)]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

La determinación de los coeficientes de los armónicos es realizada a través de la integración de datos obtenidos por una gran variedad de instrumentos y técnicas sobre las referidas observables heterogéneas (Barthelmes, 2013). A partir de estos MGG, una serie de grandezas derivadas – también conocidas como funcionales del campo de la gravedad – pueden ser obtenidas, ayudando en el modelaje de la superficie de acuerdo con la necesidad. Entre las funcionales más conocidas y utilizadas, se puede citar la altura geoidal, la anomalía de altitud y los disturbios de la gravedad.

Debido a la gran complejidad de obtención y mantenimiento de estos modelos, realizada como ya

fue expuesto anteriormente, así como a la necesidad de su normalización y estandarización a favor de usuarios alrededor del planeta, su gestión es realizada globalmente por el ICGEM – International Centre for Global Earth Models. Se trata de una organización establecida en 2003, caracterizada como uno de los seis centros del IGFS – International Gravity Field Service – de la IAG – International Association of Geodesy – que tiene como principales atribuciones mantener, de hecho, los modelos, ofrecérselos a la comunidad y actuar como agente facilitador a su acceso (Barthelmes y Köhler, 2016).

En cumplimiento a su misión fundamental, el ICGEM ofrece en su página electrónica un servicio web para generación de extractos (o grids) de funcionales de centenas de modelos ofrecidos. El usuario necesita insertar las informaciones de especificaciones exigidas para el modelo, como el nombre del modelo, funcional deseada, sistema de marea, entre otros, y para el área que desea estudiar, como los límites de latitud norte y sur, los límites de longitudes oeste y este y la dimensión de la unidad de la red (grid step). La generación de los extractos es realizada en forma de área, siguiendo el modelaje en red sobre un elipsoide de referencia, y con el apoyo de software libre para utilización de técnicas de tratamiento de datos (Barthelmes y Köhler, 2016).

Entretanto, dependiendo de la aplicación y de la precisión necesaria para el resultado, el cálculo del extracto de la funcional en forma de grid y su posterior interpolación en puntos de interés internos al área calculada presenta resultados con precisión menor que la necesaria. Sería necesario, por lo tanto, realizar una generación punto a punto de la misma funcional – modalidad que no es ofrecida por el servicio web del ICGEM.

Una alternativa comúnmente usada por expertos del área es la realización de contacto con las autoridades del ICGEM y la solicitud para cálculo preciso punto a punto, tomadas las informaciones de los puntos de interés y las especificaciones del modelo que será utilizado. Esta medida, sin embargo, denota una dependencia externa que puede no ser compatible con la demanda temporal para la ejecución del análisis, por ejemplo. Además, esta concesión realizada por el ICGEM no está prevista en sus atribuciones básicas (Barthelmes y Köhler, 2016), en la que se desprende que, en este asunto, su función es mantener “a web-interface to calculate gravity functionals from the spherical harmonic models on freely selectable grids (filtering included)”, tarea desempeñada con creces por el Centro.

Otra posibilidad de solución de la referida cuestión está relacionada al desarrollo de algoritmos basados en los coeficientes de los modelos, y en su desarro-

cálculos de cuántos puntos sean solicitados. Como resultado, la aplicación retorna una nueva planilla electrónica, de nombre idéntico seguido por el sufijo "output", conteniendo dos columnas: número identificador del punto y valor de la funcional calculada.

Debe ser resaltado una información sobre el tiempo de procesamiento de la aplicación: para cada punto, hay un tiempo de respuesta de aproximadamente 18 segundos. Esto se debe al hecho de la dependencia del acceso a la internet y a la necesidad de cálculo de los coeficientes armónicos para cada punto, diferentemente de una generación de extracto del tipo grid directamente en el servicio web, en la cual se calcula una única vez los coeficientes para todo el conjunto de puntos, lo que posibilita un tiempo de ejecución más breve. Sin embargo, la posibilidad de generarlos automáticamente, sin la necesidad de interacción con el sistema durante los cálculos, y obtenerlos de forma precisa y exenta de posibles errores de inserción de datos habla a favor de la aplicación.

A respecto de la brevedad del estudio actual, no son dadas mayores informaciones sobre la aplicación. También, el lector y toda la comunidad pueden tener acceso a la misma, así como a sus archivos de ayuda, en Nicacio (2016).

Área de estudio

De acuerdo a lo que fue relatado, a pesar de que innumerables tests fueron realizados, la formalización de la aplicación del test final demandó la determinación de un área de estudio. Para este fin, fueron seleccionados 26 (veintiséis) puntos del Banco de Datos Geodésicos del IBGE – Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (BDG/IBGE), localizadas en el estado del Paraná, Brasil, con coordenadas geodésicas y

altura elipsoidal conocidas. La figura 2 muestra una visualización del área de estudio.

La elección del área de estudio ocurrió por la disponibilidad de los datos y por la proximidad del área de estudio en relación a áreas conocidas por los autores. Es importante destacar que, como el tema ya estudiado presenta análisis de valores obtenidos punto a punto, la distribución no uniforme de los puntos sobre el área de estudio no es factor de importancia para los resultados. La tabla 1 contiene los datos de los puntos utilizados y necesarios para los cálculos de las funcionales del campo de la gravedad.

Tabla 1. Puntos del área de estudio

Id	Latitud (G Dec)	Longitud (G Dec)	Alt. Elipsoidal (m)
1	-25.45552883	-49.23743039	911.134
2	-25.44836858	-49.23095481	925.765
3	-25.45213178	-49.71363581	1149.698
4	-25.45225867	-49.23593608	913.689
5	-25.45408667	-49.23677144	911.184
6	-25.57910217	-54.55912944	185.023
7	-23.09272175	-52.44120333	467.495
8	-24.75302392	-51.77616731	894.896
9	-22.69638653	-51.79193336	375.726
10	-24.72493669	-49.98636986	1041.746
11	-24.01536589	-51.09170006	1011.977
12	-24.25569286	-49.71323728	836.262
13	-23.24646978	-50.72692783	396.114
14	-24.08081597	-54.18706069	273.153
15	-23.87490194	-53.89093139	379.521
16	-25.22658139	-50.5992965	879.153
17	-24.56654928	-51.33752842	537.333
18	-23.72239144	-52.180014	373.219
19	-23.78937044	-53.06030958	471.05
20	-24.55707736	-52.99853442	486.95
21	-24.37552928	-53.83502347	384.635
22	-25.14990814	-53.843908	676.829
23	-25.74984417	-53.05357886	514.3
24	-26.26653378	-52.78260592	694.388
25	-25.42582553	-52.01798644	773.504
26	-25.69699781	-51.65997731	1056.85

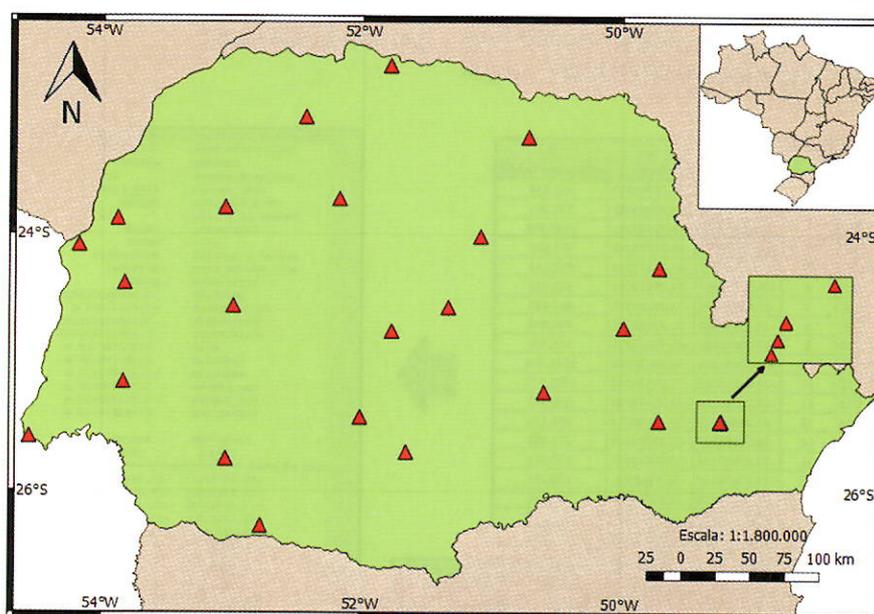


Figura 2. Área de estudio

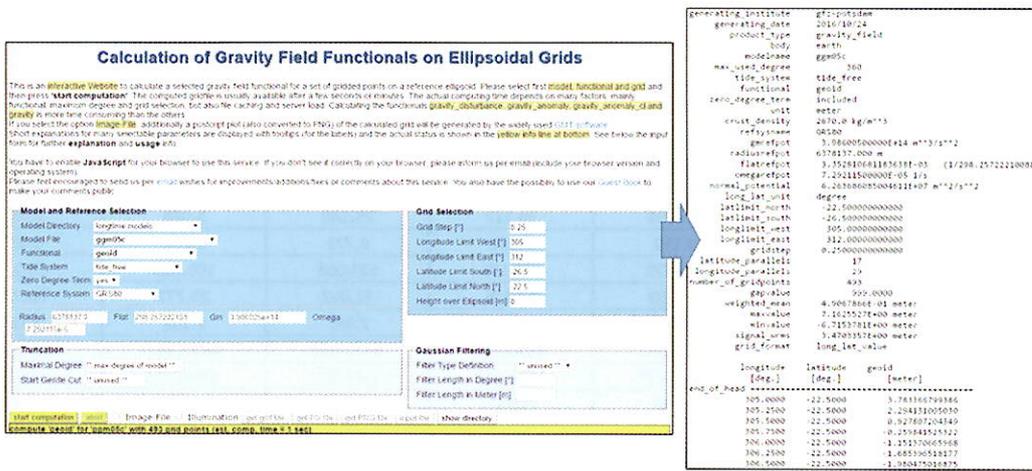


Figura 4. Obtención de los extractos tipo grid via ICGEM

- Nearest - interpolación bidimensional de vecino más próximo basada en triangulación; para este trabajo, fue denominada "INTERP1";
- Linear - interpolación bidimensional lineal basada en triangulación; para este trabajo, fue denominada "INTERP2";
- Natural - interpolación bidimensional de vecindad basada en triangulación, intermedia entre lineal y cúbica; para este trabajo, fue denominada "INTERP3";
- Cubic - interpolación bidimensional cúbica basada en triangulación; para este trabajo, fue denominada "INTERP4";
- V4 - interpolación bidimensional basada en spline biarmónica; para este trabajo, fue denominada "INTERP5";

Análisis de los datos obtenidos

Después de la realización de las interpolaciones, los resultados finales obtenidos fueron comparados individualmente, para cada punto, con los datos obtenidos punto a punto. Para hacer posible el análisis, se tomó como referencia los extractos calculados punto a punto por el ICGEM, y se realizó la comparación

de estos con los demás datos obtenidos, tanto punto a punto por el SPGG como por las interpolaciones. Finalmente, se compararon los valores máximo, medio y mínimo de diferencia entre estos resultados.

Resultados

La tabla 3 presenta los principales resultados obtenidos a través de las operaciones citadas anteriormente. Su primera columna contiene el nombre del modelo analizado - excepción hecha a la última línea, en la que es hecho un análisis general de los tres modelos. En la segunda columna, la comparación es dividida en valores máximo, medio y mínimo para cada modelo. En las columnas subsiguientes, son presentados los valores de las diferencias entre los resultados suministrados por el ICGEM, tomados como referencia, y los obtenidos por las técnicas en análisis.

Para facilitar la visualización de los datos, fue generado el gráfico constante de la figura 6, adoptando los resultados de los extractos del modelo EIGEN-6C4 y 5 (cinco) puntos elegidos aleatoriamente entre los 26 (veintiséis) calculados. Con su llegada, es posible notar, inclusive la discrepancia no apenas en valor, sino

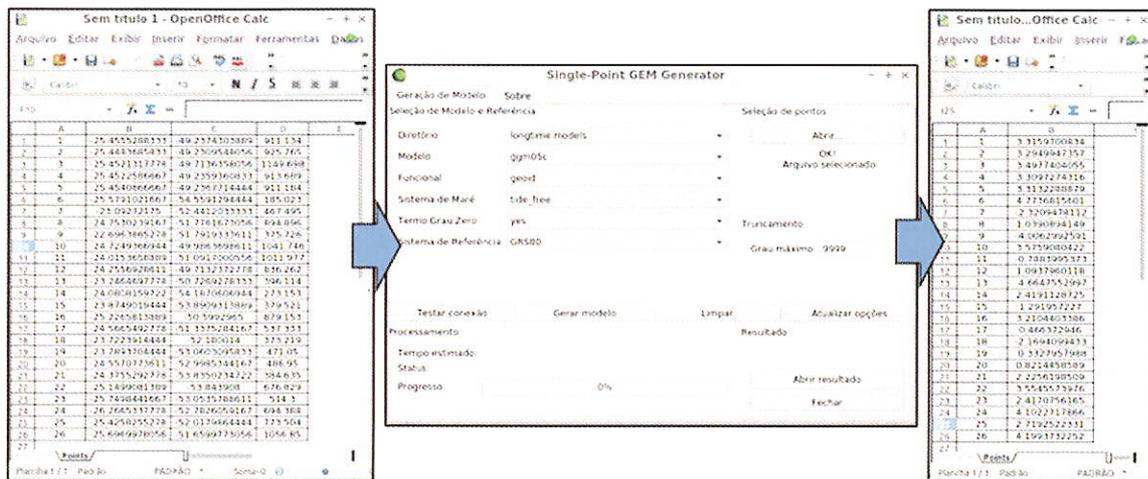


Figura 5. Obtención de los extractos punto a punto por vía SPGG

del ICGEM – a menos de diferencias entre décimos y milésimos de milímetros para los casos máximo y mínimo estudiados. También, para las interpolaciones, las diferencias llegan a aproximadamente 8.443 metros.

El análisis puede ser expandido para casos generales, no apenas a los de los tests demostrados aquí: teniendo en consideración la forma como los extractos del SPGG son calculados, así como con el conocimiento de otros tests ya realizados, se puede afirmar que los resultados del SPGG son siempre satisfactorios y precisos, presentando diferencias ínfimas al ser comparados a respuestas precisas del ICGEM. La interpolación, sin embargo, puede retornar valores realmente insatisfactorios y aún no compatibles con la realidad – conforme los puntos 7 y 18 del gráfico de la figura 6.

De esta manera, la aplicación punto a punto se muestra como una excelente alternativa para situaciones en que la alta precisión de los resultados es requerida. Esto sucede porque, a pesar de poseer un tiempo de procesamiento mayor que el sitio del ICGEM para cálculos punto a punto, ella automatiza el proceso y elimina posibilidades de falla humana durante la ejecución.

Agradecimientos

Los autores le agradecen al Ejército Brasileño, especialmente al Departamento de Ciencia y Tecnología (DCT) y al Directorio de Servicio Geográfico (DSG), por la concesión de dedicación integral al primer autor para la realización de su maestría, posibilitando también perfeccionamiento y producción científica en áreas correlacionadas, como la presente.

Los autores le agradecen al Dr. Franz Barthelmes, del ICGEM, por el contacto aproximado y por la disponibilidad de los resultados precisos, así como al ICGEM en su conjunto, por el excelente servicio prestado en la gestión y disponibilidad de los modelos terrestres.

Los autores le agradecen al PPGCG-UFPR – Programa de Postgrado en Ciencias Geodésicas de la Universidad Federal del Paraná, por la estructura, equipos y recursos humanos integrados que posibilitaron la ejecución de este trabajo.

Referencias

- BARTHELMES, F. (2013). Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models. Scientific Technical Report STR09/02. Helmholtz-Zentrum Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences. DOI: 10.2312/GFZ.b103-0902-26.

- BARTHELMES, F. & KÖHLER, W. (2016). International Centre for Global Earth Models (ICGEM). In: Drewes, H., Kuglitsch, F. Adám, J. et al., The Geodesists Handbook 2016, Journal of Geodesy (2016), 90(10), 907–1205. DOI: 10.1007/s00190-016-0948-z.
- GEMAEL, C. (2012). Introdução à Geodesia Física. Curitiba: Editora UFPR. 304 pp.
- HOFMANN-WELLENHOF, B. & MORITZ, H. (2006). Physical Geodesy. Austria: Springer-Verlag Wien. 403 pp.
- MELO, L. F. S. (2011). Avaliação de Modelos Globais do Geopotencial para os estados do Maranhão e Piauí. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- NICACIO, E. L. SPGG - Single Point GEM Generator. (2016). Recuperado en 01, septiembre, 2016m de <http://www.cienciasgeodesicas.ufpr.br/spgg>.
- TORGE, W. & MÜLLER, J. (2012). Geodesy. Berlin-Boston: Walter de Gruyter. 433 pp.

Introducción

En los últimos años, la utilización de los Sistemas de Posicionamiento Globales por satélite (GNSS), extendida de forma masiva a los ámbitos de la Geodesia, Agrimensura, Topografía y aplicaciones geomáticas, ha dado lugar a un crecimiento de la comunidad de usuarios, que demandan en mayor medida la disponibilidad de servicios e infraestructuras modernas adaptadas a la tecnología GNSS disponible (Souto, et al., 2010). Generando una gran inquietud dentro de los usuarios, sobre ¿Cuál es el tiempo necesario y suficiente de rastreo que se debe dejar el equipo para alcanzar la precisión deseada? con la finalidad de optimizar tiempo y costo. Pero para contestar esta inquietud es necesario conocer en que consiste el proceso que se desea optimizar.

En el posicionamiento relativo GNSS de tipo estático intervienen como mínimo dos receptores, uno fijo en un punto de coordenadas conocidas y uno o más receptores móviles situados en puntos cuya posición se desea conocer (Huerta, et al., 2005). El receptor permanece estacionado sobre el punto del que se quieren conocer las coordenadas durante un lapso que puede ser de algunos minutos. La posición final, las coordenadas de la estación, corresponde al promedio de todas las posiciones calculadas. (Huerta, et al., 2005). Es necesario tener en cuenta que la precisión depende de varios factores, entre los que se cita: el número de satélites visibles, la geometría de la constelación de satélites visibles, el tiempo de detección, precisión de las efemérides y perturbaciones de la ionosfera. (Cavalcante, et al., 2012)

El desarrollo de la presente investigación tomó en cuenta varios factores, tales como: tiempo, distancia, número de frecuencias, efemérides, constelaciones satelitales, período del día en el que se hace el rastreo. Con el fin de conocer ¿Cuál es la combinación de variables que permitan obtener un rastreo óptimo en función del tiempo y la distancia entre base y móvil?

Metodología

Para el procesamiento de los datos GNSS se utilizó software comercial Trimble Business Center versión 2.5, en el que se introdujo la información de todo y el mismo día de 10 puntos pertenecientes a la red de monitoreo continuo SIRGAS; las bases EPEC, CXEC Y PJEC se las fijó como bases, ingresando las coordenadas de las soluciones semanales de SIRGAS, de la semana 1873, mientras que las bases: ABEC, BHEC, EREC, NJEC, PTEC, QUEM, TNEC se las consideró como móviles para el procesamiento. Una vez que toda esta información se encontraba subida en el software lo que se procedió es a dividir al día en tres períodos cada 8 horas; el primero comprendía desde el

inicio del día GPS, 7 de la noche hasta las 3 de la mañana, el segundo iría de 3 de la mañana a 11 de la mañana y por último de 11 de la mañana a 7 de la noche.

Se definió también tiempos de postproceso: 15, 30, 45 minutos y 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 horas, con el fin de definir hasta que tiempo es óptimo dejar funcionando al equipo y en qué momento se está dando una sobre utilización, además de desmentir ciertos supuestos que se han dado en el campo laboral. La distancia era otra variable muy importante para evaluar: 10 Km (EPEC – QUEM), 36 Km (CXEC – ABEC), 54 Km (PJEC – PTEC), 102 Km (EPEC – TNEC), 152 Km (EPEC – EREC), 204 Km (EPEC – BHEC), 240 Km (EPEC – PTEC) y 292 Km (EPEC – NJEC), debido a que se conoce que esta influye en el tipo de frecuencia que se pretende utilizar en el trabajo.

Otras variables que fueron tomadas en cuenta para el procesamiento fueron las constelaciones: se procesó utilizando sólo GPS, GPS y GLONASS a la vez, esto nos sirvió para darnos cuenta la influencia que tienen las constelaciones en la precisión y determinar si existe manera de ahorrar tiempo de procesamiento y espacio que ocupan los datos al no considerar la información de varias constelaciones. Se empleó a su vez efemérides precisas finales para conocer cuando se obtiene una mejora en las precisiones y en qué caso no es recomendable. Por último se puso a prueba la premisa tan arraigada que se tiene de hasta que distancia es apto utilizar cada tipo de frecuencia y por esta razón se procesó todas las variables antes mencionadas con una frecuencia y doble frecuencia.

Por último se generaron 18 tablas de diferencias entre las coordenadas calculadas y las coordenadas de las soluciones semanales de las base de monitoreo continuo SIRGAS-ECUADOR y otras 18 tablas con las precisiones que arrojaba el postproceso. Culminando con la depuración de los datos obtenidos y la elección de las variables que más peso influían sobre el procesamiento de datos GNNSS.

Resultados

Como resultado de todo el postproceso mencionado se generaron 36 tablas, para ser más exactos, una tabla de diferencias entre las coordenadas y las coordenadas de las soluciones semanales de las base de monitoreo continuo SIRGAS-ECUADOR para efemérides precisas finales, una con la constelación GPS y otra para las constelaciones GPS y GLONASS; estas tablas se repetían por período dando un total de 9 tablas, luego había 9 tablas para una frecuencia y 9 para doble frecuencia, la misma cantidad de tablas antes mencionadas ahora para la precisión del postproceso. De esta manera se destaca:

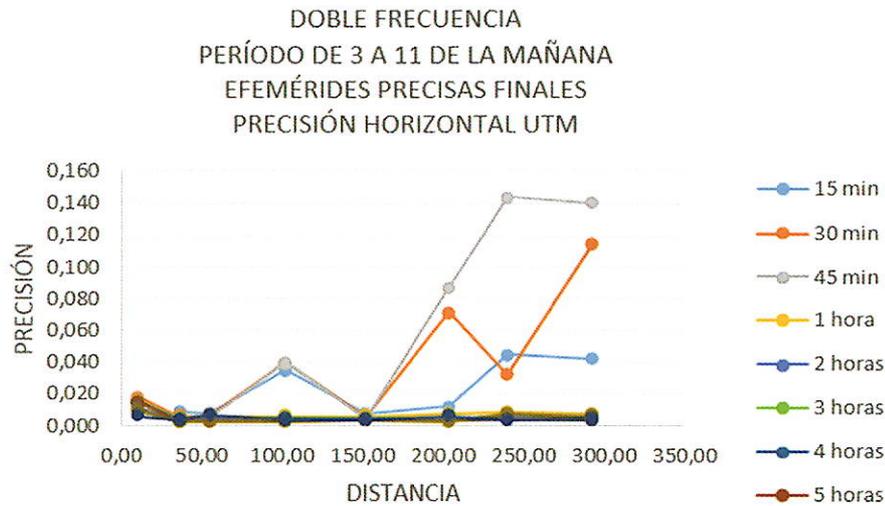


Figura 4. Precisión Horizontal vs Distancia

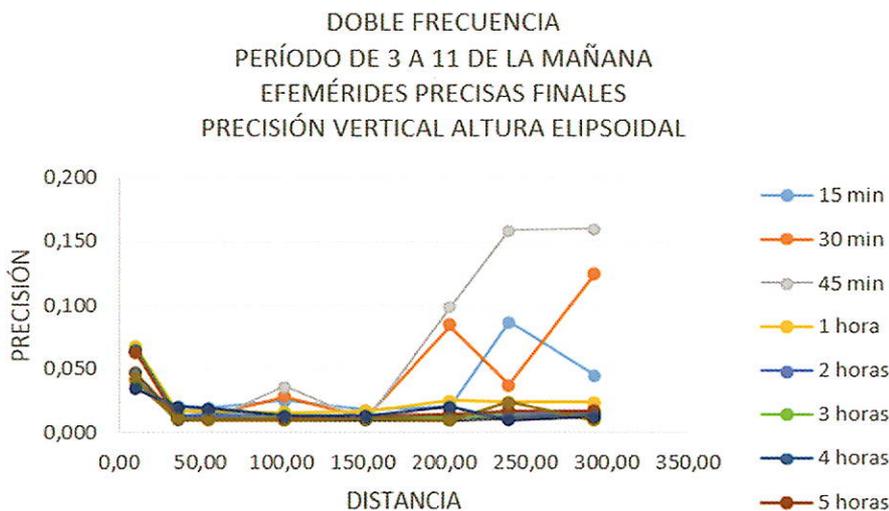


Figura 5. Precisión Vertical Altura Elipsoidal vs Distancia

Conclusiones

La tabla con menores diferencias entre las coordenadas cartesianas geocéntricas calculadas y las coordenadas de las soluciones semanales de las bases de monitoreo continuo SIRGAS-ECUADOR se obtiene con la combinación de las siguientes variables: doble frecuencia, efemérides precisas finales, en el período del día comprendido entre las 3 y 11 de la mañana, esto se puede observar en las figuras 1,2 y 3. La figura 4, indica la precisión horizontal obtenida con respecto a las coordenadas UTM; mientras que la figura 5, indica la precisión vertical respecto a la altura elipsoidal.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE y al Grupo de Investigación Geoespacial, por proveer los recursos tecnológicos y científicos.

La mejor combinación de variables para obtener un rastreo óptimo en función del tiempo y la distancia es: doble frecuencia, efemérides precisas finales, en el período del día comprendido entre las 3 y 11 de la mañana, con la que se alcanzó la menor diferencia entre coordenadas calculadas y las coordenadas de las soluciones semanales de las bases de monitoreo continuo SIRGAS-ECUADOR y la mejor precisión para las coordenadas UTM y altura elipsoidal. Es necesario señalar que tanto las diferencias como las precisiones no mostraron gran variación al trabajar con efemérides precisas y utilizando efemérides automáticas junto a las constelaciones GPS y GLONASS, incluso las diferencias y las precisiones disminuyeron usando la última combinación para distancias menores a 50 Km. Se recomienda emplear una frecuencia, sin efemérides precisas finales y la constelación GPS, en el mismo período del día para posicionamiento relativo GNSS

DIFERENCIAS OBTENIDAS DEL CONTENIDO DE VAPOR DE AGUA EN CIERTAS REGIONES DEL ECUADOR ENTRE PRODUCTOS SATELITALES Y VALORES CALCULADOS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA REGME

Porras, L¹; Romero, R¹; Herrera, M¹; Amores, M¹; Estrella, C¹; Zavala, M¹ & Tierra, A²

¹Instituto Geográfico Militar • Quito - Ecuador • Telf: +59323975100, Fax: +59322569097

²Grupo de Investigación Geoespacial • Universidad de Fuerzas Armadas-ESPE • Sangolquí - Ecuador.

Email: luis.porras@mail.igm.gob.ec; ricardo.romero@mail.igm.gob.ec; christian.pilapanta@mail.igm.gob.ec; artierra@espe.edu.ec.

Resumen

Utilizando la señal de transmisión GPS es posible estudiar diferentes procesos y encontrar relaciones para entender las condiciones físicas de la atmósfera, es así que las estaciones permanentes GNSS se convierten en estaciones multipropósitos para diferentes estudios de la alta atmósfera. Las estaciones permanentes de la REGME, además de rastrear la señal de diferentes constelaciones GNSS, también están equipadas con sensores meteorológicos que ayudan a refinar las mediciones atmosféricas como es el caso del contenido vapor de agua. En el presente estudio se busca analizar las diferencias obtenidas del contenido de vapor de agua en las estaciones permanentes de la costa ecuatoriana con los valores de plataformas satelitales de la zona, para establecer un criterio de aplicación práctica de los valores obtenidos del procesamiento GNSS, mediante índices estadísticos que proporcionen consistencia a los resultados. Se procesaron seis estaciones de la REGME en el año 2015 en el software Gamit/Globk con una estrategia de procesamiento que permita utilizar RINEX meteorológicos, y estimar valores de retraso cenital y contenido de vapor de agua. Para verificar los resultados obtenidos se usaron datos disponibles de vapor de agua de MODIS en la zona de interés y se analizaron correlaciones, SSE, MSE y RMSE de cada estación en el intervalo de cada mes. Los resultados demostraron que los valores de correlación están sobre el 0.84 por mes según el índice de Pearson, mientras que el RMSE están entre 3.5 y 5.8 mm por mes, datos que demuestran que existe consistencia de los valores generados de los sensores meteorológicos con las datos satelitales, para el 2015.

Palabras Claves: Contenido de Vapor de Agua, Sistema de Posicionamiento Global, Parámetros GPS, Espectrorradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS), Red Ecuatoriana de Monitoreo Continuo, Estaciones Meteorológicas.

Abstract

Using the GPS transmission signal it is possible to study different processes and find relationships to understand the physical conditions of the atmosphere, and for that the GNSS permanent stations become multipurpose stations for different studies of the upper atmosphere. The permanent stations of the REGME, besides tracking the signal of different GNSS constellations, are also equipped with meteorological sensors that help to refine the atmospheric measurements as is the case of the water vapor content. The present study seeks to analyze the differences in water vapor content between the GNSS permanent stations of Ecuador with the values of satellite platforms in the area, in order to establish a criterion for the practical application of the values obtained from GNSS processing. Six REGME stations were processed in 2015 in the Gamit / Globk software with a processing strategy that used the RINEX meteorological data, and was estimated the values of zenith delay and water vapor content. To see the results obtained, MODIS water vapor data were used in the area of interest and the correlations, SSE, MSE and RMSE of each station were analyzed in the interval of each month. The results showed that the correlation values are above 0.84 per month according to the Pearson index, while the RMSE is between 3.5 and 5.8 millimeters per month, data that shows that there is consistency of the values generated from the meteorological sensors with the meteorological data of the satellites.

Keywords: Water Vapor Content, Global Positioning System, GPS Parameters, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), REGME, Meteorological Sensors.

rencias obtenidas del contenido de vapor de agua en las estaciones permanentes de la costa ecuatoriana con los valores de la plataforma satelital del MODIS, para establecer un criterio de aplicación práctica de los valores obtenidos del procesamiento GNSS, mediante índices estadísticos que proporcionen consistencia a los resultados.

Metodología

GAMIT incorpora un algoritmo de mínimos cuadrados ponderado para estimar las posiciones relativas de un conjunto de estaciones, parámetros orbitales y de rotación de la Tierra, retrasos cenitales y ambigüedades de fase, ajustándose a observaciones de fase doblemente diferenciadas. Dado que el modelo funcional (matemático) que relaciona las observaciones y los parámetros no es lineal, GAMIT produce dos soluciones, la primera para obtener coordenadas dentro de unos decímetros y la segunda para obtener la estimación final. Se procesaron 06 estaciones meteorológicas de un total de 21 las cuales están enlazadas a la red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador (ver Figura 1), durante todo el año 2015, con registros diarios los 365 días del año y con intervalos cada 30 segundos.

La estrategia de procesamiento fue realizado en el software científico Gamit/Globk (Herring et al, 2015) usando el modelo de Vienna en la cual se calculó los valores de mapeo troposférico húmedo y seco y dió como resultado valores de PWV a lo largo de la columna vertical donde está ubicada la estación meteorológica. Se usó el RNX GPT 50 para la determina-

ción del archivo y/o modelo meteorológico.

En cuanto al procesamiento de los datos se usó la definición de la estrategia dada por Herring et al 2015, similar para la definición y ajuste del marco de referencia solo que además es usado la herramienta sh_metutil la cual permite extraer las estimaciones de retardo cenital del archivo de salida, aplicar correcciones para el retardo hidrostático y convertir el retraso húmedo residual en agua precipitable (ver Figura 2). La fuente de las correcciones hidrostáticas pueden ser los valores de presión introducidos en el modelo como a priori o las mediciones de la presión de la estación registradas en un archivo RINEX met (.yymmdd).

El archivo de salida contiene los parámetros del modelo lineal calculado a partir de los datos, que la herramienta sh_metutil interpolará para obtener el retardo total del zenit (ZTD). El archivo z contiene el retardo hidrostático (seco) cenital (ZHD) utilizado como a priori, con la entrada de presión y temperatura como una constante a través del sittbl. El retardo de propagación atmosférica se implementa de la manera:

$$ATDEL(EL) = DRYZEN \times DRYMAP(EL) + WETZEN \times WETMAP(EL)$$

donde EL es el ángulo de elevación del satélite, DRYZEN es el retardo del cenit seco, WETZEN es el retardo del cenit húmedo, DRYMAP es la "función de correlación" para el retraso en seco y WETMAP es la función de correlación del retardo húmedo.

Se obtuvieron datos de vapor de agua precipitable de los datos diarios obtenidos del satélite MODIS. Se

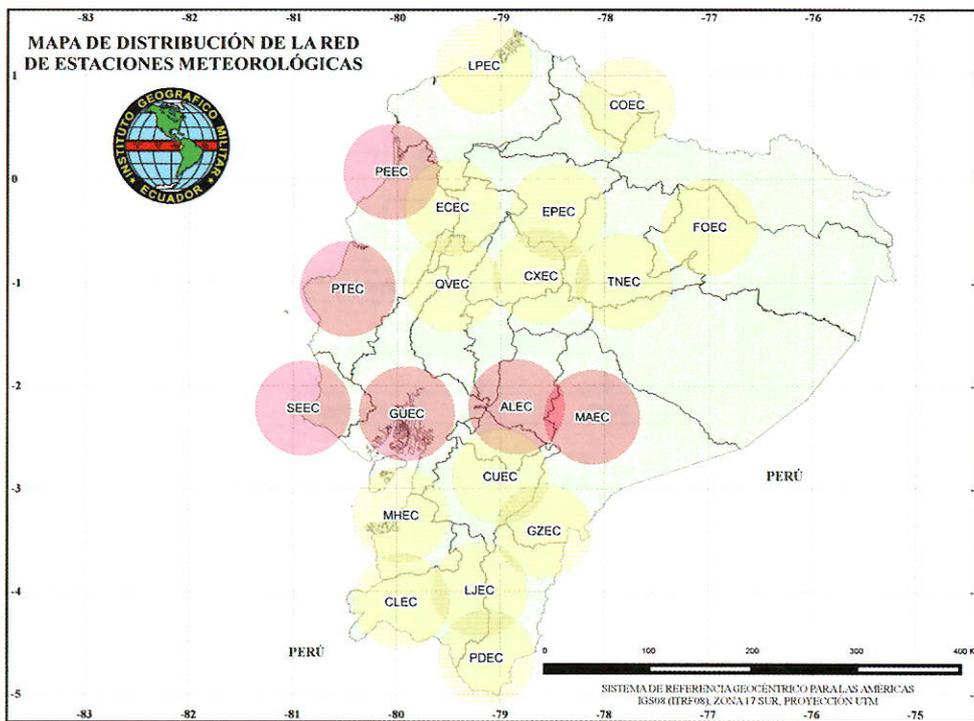


Figura 1. Mapa de distribución de la Red de Estaciones Meteorológicas del Ecuador Continental. Fuente IGM 2016

7	PR	TD	HR	WS	WD	RI	HI		
0.0000		0.0000		0.0000		0.0000			
15	1	4	0	0	1	767.9	14.1	97.6	0.0
15	1	4	0	1	1	767.7	14.1	97.6	0.0
15	1	4	0	2	1	767.9	14.1	97.6	0.0
15	1	4	0	3	1	767.9	14.2	97.7	0.0
15	1	4	0	4	1	767.9	14.1	97.4	0.0
15	1	4	0	5	1	767.9	14.0	97.3	0.0
15	1	4	0	6	1	767.9	14.1	97.5	0.0
15	1	4	0	7	1	767.9	14.3	97.7	0.0
15	1	4	0	8	1	767.9	14.2	97.4	0.0
15	1	4	0	9	1	767.9	14.1	97.2	0.0
15	1	4	0	10	1	767.9	14.0	97.3	0.0
15	1	4	0	11	1	767.9	13.9	97.4	0.0
15	1	4	0	12	1	767.9	13.9	97.5	0.0
15	1	4	0	13	1	767.9	13.9	97.7	0.0
15	1	4	0	14	1	767.9	14.0	97.8	0.0
15	1	4	0	15	1	767.9	14.0	97.9	0.0
15	1	4	0	16	1	767.9	14.0	98.0	0.0
15	1	4	0	17	1	768.0	14.2	98.0	0.0
15	1	4	0	18	1	768.0	14.3	97.9	0.0
15	1	4	0	19	1	768.0	14.2	97.4	0.0
15	1	4	0	20	1	768.0	14.1	97.2	0.0
15	1	4	0	21	1	768.0	14.1	97.2	0.0
15	1	4	0	22	1	768.0	14.2	97.2	0.0
15	1	4	0	23	1	768.0	14.2	97.1	0.0
15	1	4	0	24	1	768.1	14.1	97.0	0.0
15	1	4	0	25	1	768.1	14.1	97.0	0.0

Figura 4. Archivo Meteorológico crudo obtenido de las estaciones de monitoreo continuo de la REGME, el cual provee información cada segundo de las siguientes componentes: Presión (PR), Temperatura (TD) y Humedad Relativa (HR).

Resultados y Discusión

El archivo rinex meteorológico crudo (ver Figura 4) provee información cada segundo de las siguientes componentes: Presión (PR), Temperatura (TD) y Humedad Relativa (HR). Ahora el archivo m-file obtenido mediante la herramienta sh_metutil provee información cada hora de las componentes: Presión (Press), Temperatura (Temp), Retraso cenital seco (Wet Zen), Retraso cenital húmedo (ZHD), Retraso cenital total (Total Zen) y Vapor de agua precipitable (PW). (ver Figura 5)

Utilizando el programa R Studio se trataron los datos de las 06 estaciones ubicadas en varias zonas del territorio Ecuatoriano (ver Figura 1) y las cuales entraban en el cuadro de coordenadas de las que se obtuvieron los datos de vapor de agua precipitable del sensor MODIS; y al registrarse los datos por horas, se procedió a sacar los promedios mensuales de

cada una. Usando la herramienta “Add grid values to points” del software SAGAgis, los datos de puv del sensor MODIS ingresaron en la tabla de atributos de la capa de puntos creada con los datos de las estaciones de monitoreo continuo y se realizó el índice de correlación para los meses en los cuales las estaciones habían registrado datos, de manera tal que como producto final se obtuvo una tabla con los valores de diferencia y coeficientes de correlación de cada mes en los cuales se asentaron valores en cada estación.

En la Tabla 1 se puede observar que existen ciertos periodos (febrero, octubre y noviembre) en los cuales la estación de Pedernales (PEEC) no registró datos en la estación meteorológica. Al calcular las diferencias porcentuales entre los valores de las estaciones IGM-MET y los valores del MODIS se pueden apreciar que en las estaciones de la costa esta diferencia es menor del 10%, seguida por la estación de la región Sierra con un promedio de 14,18% y finalmente la estación ubi-

Yr	Doy	Hr	Mn	Sec	Total Zen	Wet Zen	Sig Zen	PW	Sig PW (mm)	Press (hPa)	Temp (K)	ZHD (mm)
2015	4	0	0	0.	1884.60	129.57	7.40	20.73	1.18	767.90	287.26	1755.03
2015	4	1	0	0.	1884.90	128.50	6.10	20.56	0.98	768.50	287.26	1756.40
2015	4	2	0	0.	1885.60	127.37	5.10	20.36	0.82	769.30	286.86	1758.23
2015	4	3	0	0.	1887.10	128.19	5.90	20.50	0.94	769.60	286.96	1758.91
2015	4	4	0	0.	1886.70	127.79	6.60	20.43	1.05	769.60	286.86	1758.91
2015	4	5	0	0.	1879.00	121.00	5.60	19.36	0.90	769.20	287.16	1758.00
2015	4	6	0	0.	1900.30	143.90	6.80	23.21	1.10	768.50	290.40	1756.40
2015	4	7	0	0.	1876.50	120.34	5.40	19.22	0.86	768.40	286.46	1756.16
2015	4	8	0	0.	1902.10	147.07	5.40	23.53	0.86	767.90	287.15	1755.03
2015	4	9	0	0.	1932.70	178.59	5.60	28.76	0.90	767.50	289.76	1754.11
2015	4	10	0	0.	1926.60	171.58	5.30	27.62	0.85	767.90	289.56	1755.02
2015	4	11	0	0.	1925.00	169.52	5.10	27.27	0.82	768.10	289.36	1755.48
2015	4	12	0	0.	1922.80	166.40	5.50	26.76	0.88	768.50	289.26	1756.40
2015	4	13	0	0.	1928.60	170.84	5.20	27.55	0.84	769.10	290.36	1757.76
2015	4	14	0	0.	1909.30	151.99	5.20	24.32	0.83	768.90	287.10	1757.31
2015	4	15	0	0.	1890.20	133.34	5.20	21.42	0.84	768.70	288.80	1756.86
2015	4	16	0	0.	1899.30	142.22	5.90	22.91	0.95	768.80	289.96	1757.08
2015	4	17	0	0.	1905.90	148.59	4.90	23.89	0.79	768.90	289.06	1757.31
2015	4	18	0	0.	1902.40	146.23	5.60	23.54	0.90	768.40	289.66	1756.17
2015	4	19	0	0.	1900.20	145.40	6.30	23.43	1.02	767.80	289.96	1754.80
2015	4	20	0	0.	1898.60	144.49	5.80	23.24	0.93	767.50	289.36	1754.11
2015	4	21	0	0.	1896.80	142.91	7.80	22.76	1.25	767.80	287.96	1754.70
2015	4	22	0	0.	1897.00	142.20	6.00	22.77	0.96	767.80	287.46	1754.80
2015	4	23	0	0.	1899.00	143.06	6.40	22.88	1.02	768.30	287.06	1755.94

Figura 5. Archivo m-file obtenido mediante la herramienta sh_metutil provee información cada hora de las componentes: Presión (Press), Temperatura (Temp), Retraso cenital seco (Wet Zen), Retraso cenital húmedo (ZHD), Retraso cenital total (Total Zen) y Vapor de agua precipitable (PW).

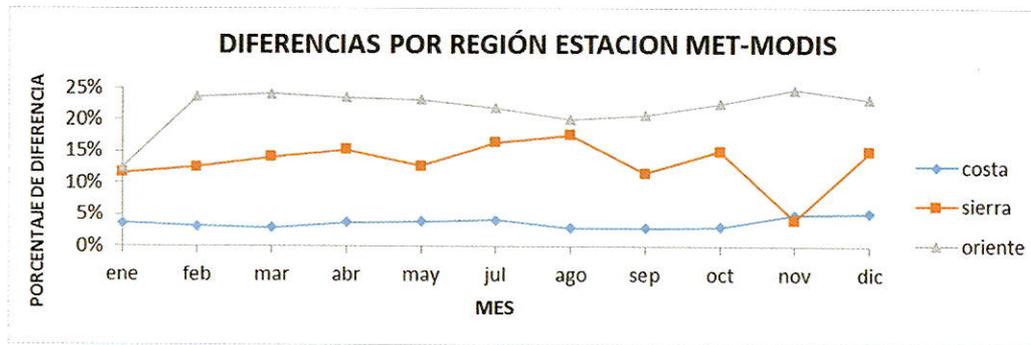


Figura 6. Porcentaje de diferencias obtenidas entre las 06 Estaciones MET-IGM y el Sensor MODIS por mes durante el año 2015 por Región.

meteorológicos con las datos satelitales, para el 2015, lo que permite concluir que los valores de vapor de agua calculados en el procesamiento geodésico, pueden ser aplicados en situaciones prácticas, tanto para estimación de disponibilidad de agua precipitable, así como modelamiento para la toma de decisiones para la gestión de riesgos.

Se observa que la mayor discrepancia entre los datos medidos por las estaciones MET y aquellos provenientes del sensor MODIS son los valores obtenidos en la región oriental, pudiendo explicarse ésta diferencia en base a dos procesos de interacción entre la atmósfera y el sensor que afectan directamente la radiación electromagnética recibida por el sensor

Es necesario realizar mediciones en intervalos diarios e incorporar un mayor número de estaciones meteorológicas, lo que permitirá una mayor precisión en los valores de correlación entre los sensores y en los resultados de las mediciones de la red de monitoreo continuo del Ecuador ya que el vapor de agua es el único constituyente que posee un momento dipolar que contribuye a la refractividad de la señal del sistema satelital de navegación global (GNSS).

Referencia

- Barnes, W. L., Pagano, T. S., & Salomonson, V. V. (1998). Pre-launch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1088-1100.
- Bevis M., Businger S., Chiswell S., Herring T.A., Anthes R.A., Rocken C. and Ware R.H., 1994: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of applied meteorology*, 33(3), 379-386.
- Bevis M., Businger S., Herring T., Rocken C., Anthes R. and Ware R., 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), 15787-15801.
- Gao, B. C., & Goetz, A. F. (1989). Column atmospheric water vapor retrievals from airborne imaging spectrometer data.
- Herring T.A., King R.W., Floyd M., and McClusky S., 2015: Introduction to GAMIT/GLOBK, Release

10.6. Available in Department of Earth, Atmospheric and Planetary Science at MIT. <http://www-gpsg.mit.edu/>.

- Herring T.A., 1992: Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. *Proceedings of Refraction of Transatmospheric signals in Geodesy*, eds. J.C. De Munck and T.A. Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy, 36.
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., ... & Lucht, W. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249.
- Kaufman, Y. J., & Gao, B. C. (1992). Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 871-884.
- King, M. D., Kaufman, Y. J., Menzel, W. P., & Tanre, D. (1992). Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(1), 2-27.
- Kuo, Y. H., Zou, X., and Guo, Y. R., 1996: Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic mesoscale adjoint model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments. *Monthly Weather Review*, 124(1), 122.
- Nilsson T., Böhm J., Wijaya D.D., Tresch A., Nafisi V., and Schuh H., 2013: Path delays in the neutral atmosphere. In *Atmospheric Effects in Space Geodesy* (pp. 73-136). Springer Berlin Heidelberg.
- Nistor S., and Buda A.S., 2015: Using Different Mapping Function In GPS Processing For Remote Sensing The Atmosphere. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 5(2), 73-80.

“CORRELACIÓN ENTRE EL DESPLAZAMIENTO SUPERFICIAL MEDIDO CON OBSERVACIONES GPS Y LA ACTIVIDAD SÍSMICA: CASO M5.6, ESMERALDAS, ECUADOR, 2012.”

Cedillo Balcázar, Jackson Valentín, Ing; Serrano Agila, Richard Germán, PhD
 UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

RESUMEN

Las estaciones de la Red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador (REGME) y de la Red del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas de operación Continua (SIRGAS-CON) son afectadas constantemente por fenómenos físicos que afectan su posición en el tiempo. Esta investigación analiza la influencia de la actividad sísmica en el comportamiento de las series temporales de estaciones de la REGME. El caso de estudio es el sismo M5.6 del 08 de febrero de 2012 que se registró en la provincia de Esmeraldas.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación consiste en el análisis del cambio de posición geodésica de estaciones en el tiempo por medio de series temporales, análisis que se aplica al evento M 5.6 de Esmeraldas-Ecuador registrado en febrero de 2012. Se determina la velocidad y dirección de desplazamiento de las estaciones ESMR, QVEC y SNLR.

METODOLOGÍA

El procedimiento necesario para generar, interpretar y analizar las series temporales se divide en tres fases, indicadas en la Figura 1. Se realiza la descarga de coordenadas semanales de la Red SIRGAS-CON, así como coordenadas del IGM-Ecuador en formato RINEX de observaciones disponibles antes, después, durante y antes-después del evento sísmico con intervalos de observación cada 30 segundos y diarios. Con las velocidades de desplazamiento Norte y Este se obtiene la velocidad Nor-Este y su orientación en base a funciones trigonométricas básicas y, conjuntamente con el valor de la desviación estándar, se realiza el mapeo de los resultados con GMT a través de módulos escritos en Notepad++.

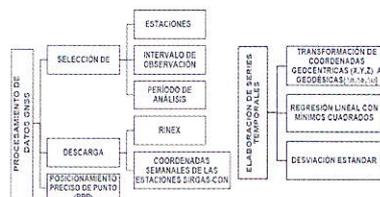


Figura 1. Izq: Procedimiento de procesamiento de datos GNSS. Der: Procedimiento de elaboración de series temporales, a partir de coordenadas geocéntricas. Fuente y Elaboración: Los Autores.

RESULTADOS

Automatizando la metodología se obtienen las series temporales como la mostrada en la Figura 2.

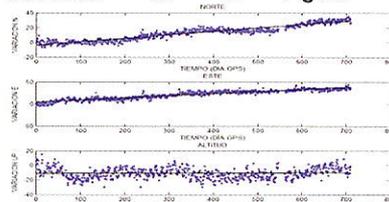


Figura 2. Serie Temporal estación ESMR antes-después del evento sísmico. Fuente y Elaboración: Los Autores.

Posteriormente se realiza el mapeo de velocidades de desplazamiento antes, después y antes-después del evento indicadas en la Figura 3.

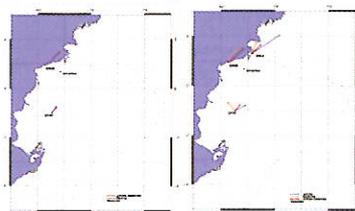


Figura 3. Izq: Velocidades de desplazamiento estaciones ESMR, QVEC y SNLR con datos diarios RINEX antes, después y antes-después del evento sísmico. Der: Velocidades de desplazamiento estaciones ESMR y QVEC antes-después del evento sísmico con coordenadas diarias RINEX vs coordenadas semanales SIRGAS. Fuente y Elaboración: Los Autores.

Los resultados obtenidos de las series temporales para la estación ESMR se muestran en la Tabla 1. Donde V.N, V.E y V N-E representan velocidad Norte, velocidad Este Y velocidad Nor-Este respectivamente.

Estas velocidades están expresadas en milímetro/año (mm/a). También se muestran las desviaciones estándar indicadas por la letra griega sigma.

Tabla 1. Resultados series temporales ESMR

Periodo	X		Y		Z		XY	
	VN (mm/a)	σ	VESTE (mm/a)	σ	V UP (mm/a)	σ	V(N-E)	σ
Antes(A)	18.1954	0.585	22.565	0.6877	1.1785	1.3421	28.989	0.9036
Después(D)	17.9218	0.6886	13.6781	0.5746	14.1828	1.2033	20.9638	0.8953
A.D	16.8758	0.2263	17.5005	0.2554	0.7368	0.4944	24.3138	0.3413
SIRGAS	17.4211	0.2863	16.912	0.2569	-0.7388	0.6242	24.2288	0.3858

Fuente y Elaboración: Los Autores.

CONCLUSIONES

- Antes, después y antes-después del evento sísmico la dirección de desplazamiento tiende al Nor-Este.
- Las direcciones obtenidas con datos diarios RINEX y coordenadas de la red SIRGAS-CON son muy cercanas.
- Las velocidades de desplazamiento obtenidas con datos diarios RINEX son ligeramente inferiores a las obtenidas con coordenadas de la red SIRGAS-CON.
- Los desplazamientos producidos durante el evento sísmico son visibles únicamente con las series generadas con datos cada 30 segundos.
- Las velocidades obtenidas con datos antes del evento sísmico presentan magnitudes mayores que las obtenidas después del evento sísmico.

BIBLIOGRAFÍA

Cisneros, D. (2013). "Análisis de la red nacional GPS pasiva enlazada al sistema de referencia SIRGAS95 y su evolución hacia la nueva infraestructura soportada por la red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador", Instituto Geográfico Mili-tar,Ecuador.

Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional, (2013). "Informe Sísmico para el Ecuador", Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, pp. 1-26.

CUANTIFICACIÓN DE LAS DISCREPANCIAS EN LAS ESTACIONES DE LA RED SIRGAS DE COSTA RICA CONSIDERANDO SOLUCIONES FINALES SIRGAS Y SOLUCIONES PPP EN LÍNEA



Jorge Moya Zamora^{1 y 2}, José Francisco Valverde Calderón² y Sara Bastos Gutiérrez²
 1 Escuela de Ingeniería Topográfica. Universidad de Costa Rica
 2 Centro Nacional de Procesamiento de Datos GNSS. Universidad Nacional. Costa Rica

1. Resumen

En el estudio se consideraron un total de 10 estaciones GNSS de la red SIRGAS de Costa Rica (ver figura 1) y archivos diarios de observación por un período de un año (2014,5 a 2015,5). La metodología de trabajo implementada consistió en el procesamiento en línea por medio del servicio CSRS cuyas soluciones de coordenadas fueron comparadas con las soluciones finales semanales de SIRGAS. Se establecieron tres niveles de comparación entre las soluciones PPP y las soluciones SIRGAS. Luego ambos conjuntos de soluciones se usaron para determinar los 6 parámetros de transformación para cada una de las semanas comprendidas en el estudio. Los resultados fueron significativos, con valores de $-58,5 \text{ mm} \pm 17,5 \text{ mm}$, de $-34,3 \text{ mm} \pm 6,2 \text{ mm}$ y de $-161,6 \text{ mm} \pm 26,2 \text{ mm}$ para las traslaciones en [X,Y,Z] respectivamente y rotaciones promedio en los tres ejes de $0,003600'' \pm 0,000341''$. Estos resultados evidenciaron una traslación en la dirección norte-sur de la solución PPP respecto a SIRGAS. Los resultados obtenidos generaron parámetros que pueden ser usados a la hora de hacer una georreferenciación de información geoespacial procesada con PPP al marco dado por SIRGAS.

2. Metodología

- Se trabajó con 10 estaciones SIRGAS de Costa Rica, cuya ubicación se presenta en la figura 1.
- Las coordenadas geocéntricas [XYZ] que se obtuvieron de este proceso de denominaron como soluciones PPP; mientras que las coordenadas geocéntricas finales calculadas por SIRGAS fueron denominadas como soluciones SIR.
- De esta manera cada una de las 10 estaciones consideradas en el estudio, contaba con dos juegos de coordenadas geocéntricas (PPP y SIR).
- Basado en los dos vectores de coordenadas se realizó una triple comparación de los resultados: una comparación diaria (soluciones PPP), una segunda tomando el promedio PPP y comparando con las diarias y una tercera respecto a SIRGAS.

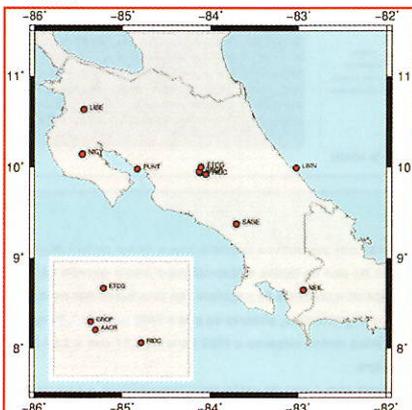
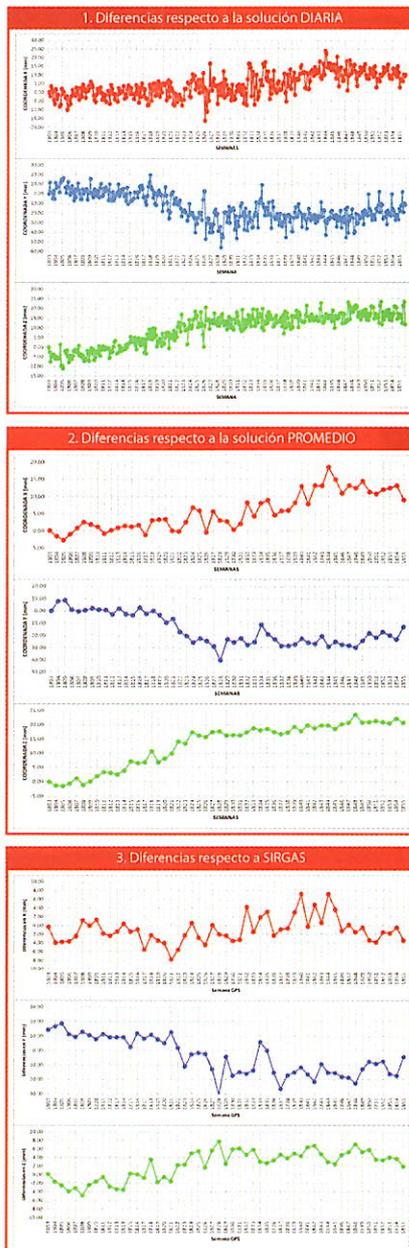


Figura 1. Ubicación de las estaciones SIRGAS de Costa Rica, en el recuadro la ubicación de las estaciones del sector central

3. Resultados



- En el cuadro se presenta el rango de variabilidad de las coordenadas PPP respecto a cada una de las tres comparaciones efectuadas.
- Se aprecia como la variabilidad diaria de las soluciones PPP, dependiendo de la ubicación de la estación puede llegar a unos $\pm 10 \text{ cm}$.
- En el caso del promedio, la variabilidad es menor llegando a un valor de $\pm 5 \text{ cm}$.
- Al comparar la solución PPP promedio con la solución final SIRGAS se ve una reducción considerable de los valores llegando a ser prácticamente la mitad y en algunos casos inclusive menor. La diferencia mayor en esta caso fue de $\pm 3 \text{ cm}$.
- La coordenada con mayor discrepancia es la Y la cual representa la componente vertical en Costa Rica.

EST.	Diarias			Semanales			SIRGAS		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
AACR	40,1	75,6	34,4	21,2	49,0	25,1	6,7	26,6	7,1
CRCP	62,2	98,0	75,4	26,6	32,5	27,6	9,6	12,6	7,6
ETCG	36,4	76,8	30,6	14,6	28,7	21,2	6,6	11,4	4,6
LIBE	27,8	63,3	24,9	10,7	21,8	15,6	5,4	11,5	4,2
LIMN	52,7	98,2	30,1	28,1	28,0	13,4	7,2	17,8	3,4
NEIL	39,3	59,8	32,2	24,1	25,0	21,0	5,2	9,7	3,4
NICY	31,0	62,3	21,7	15,0	21,9	11,0	7,8	13,1	4,5
PUNT	36,0	69,5	32,6	17,8	28,6	15,2	5,1	14,5	2,9
RIDC	47,7	73,0	26,9	20,1	32,9	19,7	6,7	17,0	2,6
SAGE	48,5	49,4	31,2	28,4	24,9	23,7	6,0	9,3	14,5

- Con base en los conjuntos de soluciones (PPP y SIR) se determinaron los 6 parámetros de transformación semanales ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, RX, RY, RZ$). Los resultados están en el cuadro siguiente.

Parámetro	WTPv	Se	Valor ajustado	Error
Traslación en X	55,52	1,08	-58,47 mm	$\pm 17,5 \text{ mm}$
Traslación en Y	51,84	1,04	-34,32 mm	$\pm 6,2 \text{ mm}$
Traslación en Z	45,03	0,97	-161,60 mm	$\pm 26,2 \text{ mm}$
Rotación en X	27,63	0,36	0,003600''	$\pm 0,000341''$
Rotación en Y	3,50	0,27	0,000837''	$\pm 0,000860''$
Rotación en Z	24,85	0,72	0,003594''	$\pm 0,000386''$

3. Conclusiones

- Se encontró una diferencia significativa entre coordenadas PPP y las derivadas de SIRGAS como era de esperarse, sin embargo, se logró hacer una primera estimación nacional de su discrepancia, las cuales en promedio representan unos 26 mm en coordenadas [XY] y de unos 57 mm en la coordenada [Z].
- Lo anterior evidencia que para trabajar con PPP dentro del marco SIRGAS, es necesario contemplar en promedio diferencias del orden anterior para una adecuada georreferenciación de la información espacial.
- Las coordenadas geocéntricas derivadas de un procesamiento PPP en línea, son una solución práctica, gratis y rápida. Ofrece una alta potencialidad si se usa correctamente. No alcanza las exactitudes de la geodesia moderna, sin embargo en otras aplicaciones puede brindar una opción a tener en cuenta.

DETERMINACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA LA TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS ENTRE LOS SISTEMAS DE REFERENCIA PSAD56 Y SIRGAS95, UTILIZANDO TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

H. Guajala; C. Leiva; M. Zambrano

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

RESUMEN

La transformación de coordenadas entre los sistemas de Referencia PSAD56 y SIRGAS95, surge de la necesidad de compatibilizar la información obtenida con técnicas de posicionamiento por satélite (sistemas GNSS) que utilizan dátums geocéntricos como SIRGAS, con el dátum topocéntrico PSAD56, aún vigente en Ecuador, a través de la Ley de Cartografía Nacional. El IGM como ente rector de la cartografía en el país, maneja una metodología estándar para esta transformación de coordenadas, mediante el modelo matemático de Helmert 3D y la definición de 7 parámetros (3 traslaciones, 3 rotaciones y un factor de escala). Sin embargo, ha demostrado no ser aplicable a escalas grandes, por lo cual se desarrolló la presente metodología con un enfoque estocástico, basado en técnicas geoestadísticas para la obtención de modelos de predicción espacial para las variables de desplazamiento de latitud y longitud ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$), utilizados posteriormente en la transformación de coordenadas geodésicas (ϕ , λ) entre los sistemas de referencia mencionados. Se utilizaron 149 puntos geodésicos, comunes entre los dos sistemas, destinando 107 puntos para el modelamiento con Kriging ordinario puntual en el software R, paquete Rgeostats y 42 puntos para la verificación de los modelos obtenidos y del modelo de Helmert de uso vigente. Los resultados muestran que el método geoestadístico aplicado disminuye el error de transformación, comparado con el modelo de Helmert, obteniendo un error de (0.33 m, 0.57 m) al 95 % de confianza versus un error de (1.04 m, 1.35 m) del modelo matemático, al mismo nivel de confianza.

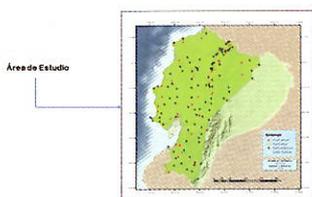
GENERALIDADES

El Instituto Geográfico Militar a partir del año 2003 ha utilizado el modelo matemático de Helmert para la transformación de coordenadas entre los Sistemas de Referencia PSAD56 y SIRGAS95, demostrando ser compatible a escalas 1:25000 y mayores. Esta investigación pretende dar una nueva metodología a la transformación de coordenadas, mediante el uso de técnicas geoestadísticas que a través de modelos de predicción espacial, determinan el comportamiento de las variables desplazamiento de latitud y longitud ($\Delta\phi$ y $\Delta\lambda$), entre los sistemas de referencia mencionados. El modelo determinístico planteado inicialmente se convierte en un modelo probabilístico expresado de la siguiente manera:

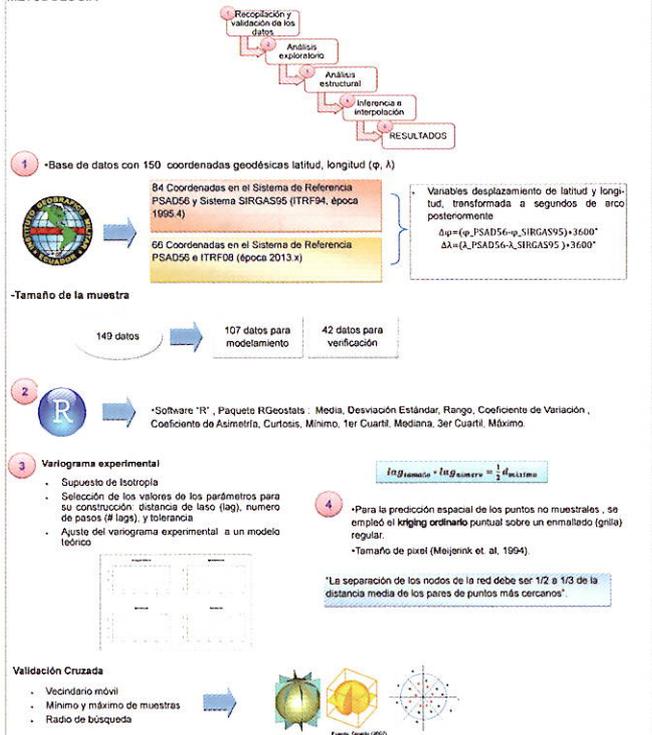
$$\Delta\phi = (\phi_{PSAD56} - \phi_{SIRGAS95}) + \epsilon$$

$$\Delta\lambda = (\lambda_{PSAD56} - \lambda_{SIRGAS95}) + \epsilon$$

El ruido estocástico (ϵ) explica las fuentes de variabilidad con lo cual el modelo determinístico pasa a ser un modelo probabilístico, lo cual hace posible el uso de técnicas geoestadísticas. Esta variabilidad se presenta debido a que los modelos determinísticos utilizados no han logrado compatibilizar y minimizar el error en la transformación de coordenadas, con lo cual indudablemente un modelo probabilístico resulta ser más adecuado para describir mejor la situación.



METODOLOGÍA

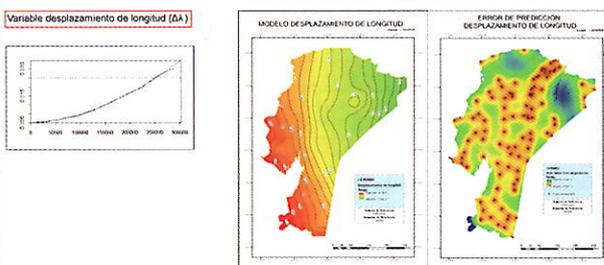
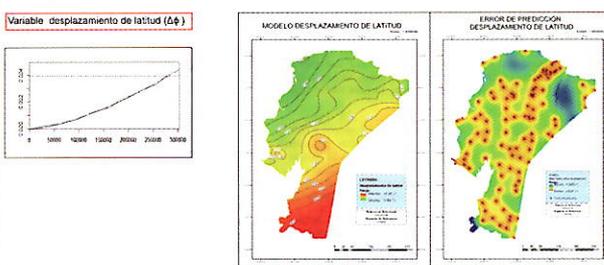


RESULTADOS

Ajuste de un modelo técnico a los variogramas experimentales generados para cada variable

Variable	Modelo	Sill o meseta (σ^2)	Rango o distancia (h)
Desplazamiento de latitud $\Delta\phi$	Potencia	C = 0.00454	30599
Desplazamiento de longitud $\Delta\lambda$	Potencia	C = 0.0311	36684

Modelos de predicción espacial, tanto para la variable desplazamiento de latitud como para la variable desplazamiento de longitud



Transformación de coordenadas una vez usado los modelos, mediante la ecuación:

$$\lambda_{(SIRGAS95)} = \lambda_{(PSAD56)} + (\Delta\lambda / 3600'')$$

$$\phi_{(SIRGAS95)} = \phi_{(PSAD56)} + (\Delta\phi / 3600'')$$

COMPARACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE HELMERT CON EL MODELO GEOESTADÍSTICO

	MODELO DETERMINÍSTICO Modelo Matemático de Helmert (7 parámetros)	MODELO GEOESTADÍSTICO
Muestra	42 puntos	42 puntos
Media	1.193 m	0.459 m
Desviación estándar	0.521 m	0.413 m
Varianza de la muestra	0.271 m ²	0.171 m ²
Mínimo	0.164 m	0.035 m
Máximo	2.244 m	2.101 m
Intervalo de confianza	1.035m - 1.350m	0.334-0.584m
ME	1.193 m	0.459 m
MSE	1.393 m ²	0.319 m ²

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se comprobó que el modelo geoestadístico es más eficiente para transformar coordenadas entre sistemas de referencia. El análisis de las medidas descriptivas: media, varianza, desviación estándar, ME y MSE, concluyó que este procedimiento dio mejores resultados, y un intervalo de confianza más estrecho de [0.327 m, 0.567 m] al 95%, a diferencia del modelo matemático de Helmert que presenta un intervalo de confianza de [1.035 m, 1.350 m]. Una de las conclusiones a las que se llegó se debe a que el interpolador kriging hace una predicción local al usar un vecindario de búsqueda, mientras que el modelo determinístico establece parámetros de transformación global, por lo cual el modelo de predicción mejora considerablemente el resultado.
- En base a los resultados obtenidos, en este estudio, se recomienda el uso de los modelos geoestadísticos para la transformación de coordenadas, al método matemático de Helmert, que actualmente se usa en el país, especialmente para escalas grandes.
- Para futuros estudios enmarcados en esta problemática, se recomienda analizar la anisotropía de las variables $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, en vista de que en el presente estudio se usó la hipótesis de isotropía.

AGRADECIMIENTOS

- Al Instituto Geográfico Militar por el apoyo técnico y científico que nos ha brindado para el desarrollo de esta investigación
- A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por la formación y el conocimiento que ha impartido durante toda la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, lo que ha impulsado a realizar este trabajo.

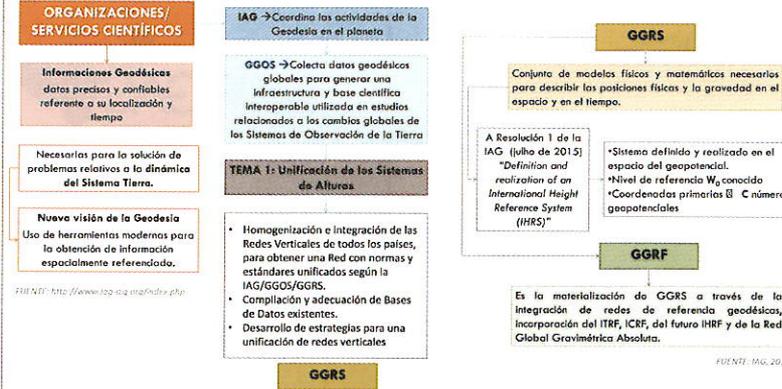
ESTRATEGIAS PARA LA CONEXIÓN DE REDES VERTICALES HETEROGÉNEAS CON BASE EN EL PVCG EN LA FORMA FIJA

A.G. Santacruz Jaramillo⁽¹⁾; S.R.C. de Freitas⁽²⁾; R.T. Luz⁽²⁾⁽³⁾; M. A. Nunes⁽²⁾

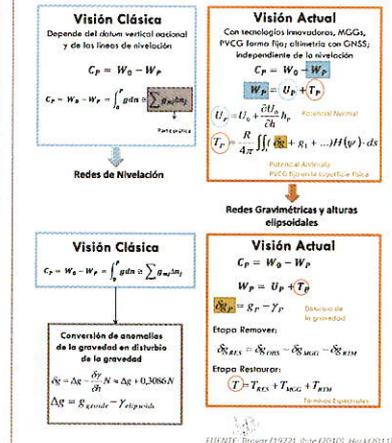
(1) Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, PR, Brasil, P.O. Box 19.001 [f.freitas@ufpr.br; andrea.santacruz@ufpr.br]
 (2) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil [roberto.luz@ibge.gov.br; marcelo.nunes@ibge.gov.br]
 (3) Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Departamento de Engenharia Cartográfica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil [betatiur@yahoo.com.br]

INTRODUCCIÓN:

En los dos años últimos varios iniciativas y manifestaciones dentro de las Naciones Unidas relacionadas con el control de los cambios globales, que apuntan a una profunda reflexión en la concepción y realización de Sistemas Geodésicos de Referencia. Las redes geodésicas existentes deben modernizarse para atender a los supuestos de precisión e interoperabilidad para la referencia espacial de la información. Esta visión se puede resumir como en los siguientes esquemas:

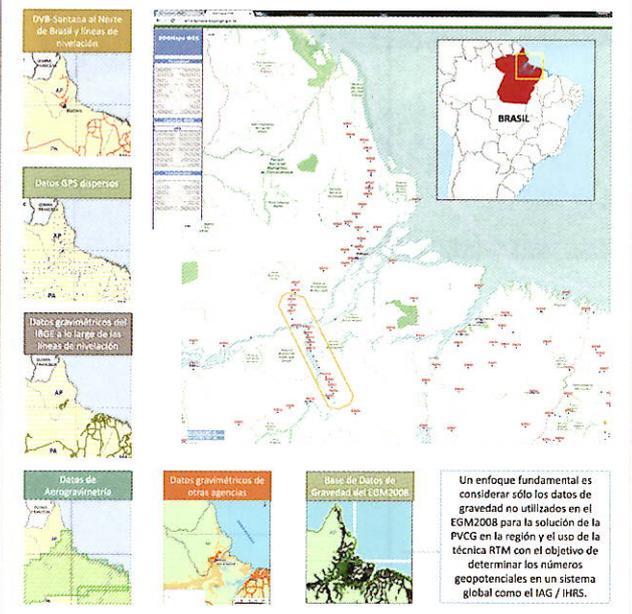


TEORÍAS APLICADAS:



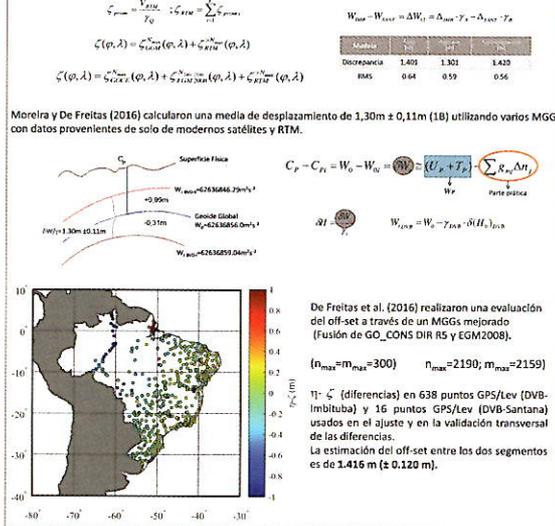
ASPECTOS DE LA MODERNIZACIÓN DEL SEGMENTO NORTE DE LA RVRB:

Área de estudio ubicado entre las ciudades de Santana, Belém y la Isla Marajó en los Estados de Amapá y Pará al Norte de Brasil. Se consideró dos segmentos referentes a las Redes de Referencia de Brasil con datos: de nivelación geométrica, gravimétricos, aerogravimétricos, GNSS, y modelos globales del geopotencial (MGGs). Considerando que los datos tienen naturaleza, colecta y precisión dispares, se quiere calcular los números geopotenciales (coordenadas primarias de las Redes Verticales), los cuales contienen significado físico real permitiendo así sus integraciones con un Sistema de Alturas Global. Actualmente la Coordinación del IBGE se encuentra coleccionando datos complementarios y realizando estudios en esta zona.



ESTUDIOS PRELIMINARES PARA CONEXIONES ENTRE SEGMENTOS:

Se han realizado algunos trabajos para la estimación del off-set entre los dos segmentos en estudio, los cuales se realizaron en el espacio geopotencial mediante la utilización de pocos puntos GPS/nivelación en asociación con MGGs y RTM. Estos estudios se concentraron sólo en la región alrededor de la boca del Amazonas. Montecino y De Freitas (2014) estimaron un off-set del DVB-Santana sobre el DVB-Imbituba de 1.301m a 1.420m, considerando el EGM2008 y dependiendo de la estrategia adoptada para la descomposición espectral y el uso de datos MDT.



AGRADECIMIENTOS:

Los autores desean agradecer al CNPq a través de Grant N. 306936/2015-1, SENESCYT, UFPR-LARAS y UERJ. Un agradecimiento especial al IBGE por proporcionar los datos actuales necesarios para esta investigación y al Dr. Vagner Ferreira junto con la Universidad de Hohai.

REFERENCIAS:

BROVAR, V. A possible improvement in the accuracy of gravimetric results in Geodesy. Sov. Astron. 15 (1972), 1055–1058. Connection of the two segments of the Brazilian Vertical Reference Network
 DE FREITAS, S.R.C. et al. (2016) Connection of the two segments of the Brazilian Vertical Reference Network. 1st Joint Commission 2 and IAGFS Meeting. International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2016. September 19-23, 2016. Thessaloniki, Greece
 IODE, J. IAG-ICP 1.2. Inter-Commission Project 1.2: Vertical Reference Frames. Report 2007-2011 of the International Association of Geodesy, 2010.
 IAG. GGRF Description, 2015.
 IAG Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRF), 2015.
 IAG. <http://www.iag-ig.org>, acceso en septiembre de 2016.
 HECK, B. (2011). "A Bravais-type solution of the fixed geodetic boundary-value problem", Stud. Geophys. Geod., 55, 441-454
 MOREIRA, R.M.; DE FREITAS, S.A.C. (2016). Conexão de Sistemas Verticais de Referência Locais ao SGR com base em um Sistema Vertical de Referência Global. Bol. Ciências Geodésicas (Online), v. 22, p. 232-247.
 MONTECINO, M.D.; DE FREITAS, S. R. C. (2014). Strategies for Connecting Imbituba and Santana Brazilian Datums Based on Satellite Gravimetry and Residual Terrain Model. In: Chris Rizos, Pascal Willis. (Org.). Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet. 1ed Berlin: Springer, v. 139, p. 543-550.





REGIÓN INSULAR
[Islas Galápagos]



COSTA
[Malecón Guayaquil]



SIERRA
[Montañas Andinas]



ORIENTE
[Selva Amazónica]

NOV-2016
SIRGAS
ECUADOR

Pedro Vicente Maldonado



Seniergues E4-676 y
Gral. Telmo Paz y Miño
PBX: (593-2) 3975 100 / 170
Apart. Post.: 17012435

www.igm.gob.ec
www.geoportalmigm.gob.ec
QUITO - ECUADOR

SIGUENOS TAMBIÉN EN:



#IGMEcuador



@GeograficoMilec