

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/277332100>

EVALUACIÓN DEL EGM₀₈ Y EGM₉₆ EN EL ECUADOR A PARTIR DE DATOS DE GPS Y NIVELACIÓN GEOMÉTRICA

Article · October 2009

CITATIONS

0

READS

1,336

1 author:



[Alfonso Rodrigo Tierra](#)

Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE

60 PUBLICATIONS 57 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



ANÁLISIS ESPACIAL GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO E HÍDRICO PARA LA ASIGNACIÓN DE LOS VALORES DE VELOCIDAD DEL CAMPO DE VELOCIDADES VEC-EC [View project](#)



VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS – UAV PARA LA ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA ESCALAS GRANDES REFERIDAS AL MARCO DE REFERENCIA SIRGAS- ECUADOR [View project](#)

EVALUACIÓN DEL EGM08 Y EGM96 EN EL ECUADOR A PARTIR DE DATOS DE GPS Y NIVELACIÓN GEOMÉTRICA

ALFONSO RODRIGO TIERRA CRIOLLO

Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. Av. Gral. Rumiñahui S/N.
Sangolquí-Ecuador
atierra@espe.edu.ec

RESUMEN

Cada día aumenta el número de usuarios de la tecnología GPS, y cada vez se realizan nuevas aplicaciones. Con la utilización de los GPS, se puede determinar las coordenadas geodésicas latitud, longitud, y altura elipsoidal siendo ésta una altura de carácter geométrico. Pero, en algunas aplicaciones es necesario que se determine una altura de carácter físico, como es la altura ortométrica. Siendo necesario que se haga una transformación entre las alturas, para lo cual es indispensable que se conozca la ondulación geoidal en ese punto. Existen diferentes métodos para calcular la ondulación geoidal en una determinada región, uno de ellos es usando los modelos geopotenciales como el EGM96 o EGM08. Estos modelos son utilizados cuando realizo posicionamiento con GPS, y en especial en nuestro país, en vista de que no se dispone de un modelo geoidal para el Ecuador. Por este motivo en este trabajo se presenta los errores que se pueden obtener en la altura, cuando utilizo el EGM96 o EGM08, y se muestra que dependiendo del área de trabajo en nuestro país, se puede alcanzar errores de hasta 4 metros.

ABSTRACT

All days increases the user's number of the technology GPS to realize new applications. With the utilization of the GPS, can to be determined the geodetic coordinates how: latitude, longitude, and ellipsoidal height, being this a geometric height. But, in some applications is necessary to determine a physical height, as it is the orthometric height, It being necessary to know the geoid undulation to realize of the transformation between these heights. There are different methods to calculate the geoid undulation how the EGM96 and EGM08, that they are geopotential models. These models are used in our country when it is carry out positioning with GPS, because there isn't one geoid model to the Ecuador. In this work is shown that the error obtained with the geopotentials models can be reached, in our country, until 4 m.

1. INTRODUCCIÓN

La Implantación de Sistemas de Navegación Global por Satélites – GNSS (por su siglas en inglés), son integrados, entre otros, por sistemas de posicionamiento por satélites, como el NAVSTAR – GPS de EE.UU (Seeber, 1993), (Galera, 2000), el GLONASS de la Ex-URSS (Hofmann et.al., 2000), GALILEO de la Unión Europea (Verhagen&Le, 2003), COMPASS de China (Gibbons, 2008), ha hecho, que cada vez existan más usuarios de esta tecnología, con la finalidad de cumplir con sus objetivos tanto científicos como de aplicaciones prácticas principalmente en algunas ingenierías. Con cualquiera de estos sistemas de posicionamiento, y mediante el rastreo a los satélites, se puede obtener la posición de cualquier objeto en cualquier parte del mundo y a cualquier hora. La posición del objeto queda determinada en la superficie terrestre, mediante coordenadas cartesianas (X,Y,Z) (Wells,1987) referidas a un sistema de referencia, cuyo origen es el geocentro (centro de masas de la Tierra), pero también vía transformaciones se puede obtener coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura elipsoidal (altura de carácter geométrico)) cuya superficie de referencia es un Elipsoide (Seeber, 1993),

(Wells,1987), (Zakatov, 1981). Sin embargo, para muchos fines, lo que se necesita es conocer una altura con características físicas, como es el caso de la altura referida al nivel medio de los mares, o una altura referida al Geoide (Torge, 1983), (Heiskanen & Moritz, 1967). La búsqueda de una superficie de referencia para alturas con significado físico (Geoide) continúa siendo una necesidad básica y una tarea fundamental en la mayoría de países, con el objetivo de integrarlo con otras tecnologías. De esta manera, se hace indispensable y necesario el conocimiento de un modelo geoidal con la finalidad de transformar la altura elipsoidal a una altura de carácter físico y de esta manera poder explotar de una forma más eficiente la tecnología de posicionamiento por satélites artificiales.

El geoide es una superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre y su determinación está estrechamente relacionada con el problema de valor de contorno en la geodesia física. Un modelo de Geoide brinda información sobre la separación entre la “Tierra Real” y el modelo adoptado como “Tierra Normal”. Esta separación es más conocida como ondulación geoidal.

En los últimos años el cálculo del Geoide ha sido, es y seguirá siendo una tarea fundamental de muchos investigadores, por lo cual han sido desarrollados modelos geoidales en casi todos los países del mundo. Diferentes métodos se han desarrollado a lo largo de la historia para posibilitar el cálculo de modelos del geoide en diferentes regiones del mundo. Todos los métodos involucran de una u otra manera el conocimiento del campo potencial de gravedad. Actualmente, los métodos empleados en la determinación de las ondulaciones geoidales son los modelos geopotenciales, modelos gravimétricos, modelos por satélites artificiales.

Los modelos geopotenciales se basan, en la determinación de los coeficientes del desarrollo en serie de funciones armónicas esféricas del potencial gravitacional terrestre. En este procedimiento se expresan los coeficientes en función de la variación de los seis elementos orbitales. En un campo gravitacional ideal no perturbado, la órbita satelital sería una elipse kepleriana. En el campo gravitatorio real el satélite es perturbado por el campo gravitacional de la Tierra, pero esa misma perturbación que sufre el satélite se utiliza para derivar información sobre dicho campo (Pacino, 1999). En este caso, las observaciones son las variaciones de los elementos orbitales y las incógnitas son los coeficientes armónicos. Surge así el modelo geopotencial donde las ondulaciones geoidales son expresadas en función de armónicos esféricos. Dentro de los modelos geopotenciales más conocidos y utilizados, se tiene el GEM (Goddard Earth Models-NASA) (Smith et.al, 1976), GRIM (Groupe de Recherche Spatial-Insitut Universitat Muchen) (Reigber et.al, 1983), OSU (Ohio State University) (Rapp & Pavlis, 1990), EGM96 (Earth Geopotential Model 1996) (Lemoine et. al, 1998), EIGEN CG03 (Jamur & De Freitas, 2007) y recientemente el EGM08 (Pavlis et.al, 2008).

Un modelo geoidal sirve para poder calcular las ondulaciones geoidales y consecuentemente poder determinar el valor de alturas de carácter físico que son necesarias tanto para la ciencia como para la ingeniería. En el caso de nuestro país, al no existir un modelo geoidal, para obtener ondulaciones geoidales con una buena precisión, lo que generalmente los usuarios están utilizando son Modelos Geopotenciales que tienen cobertura mundial, como es el caso del EGM96 (Earth Geopotential Model) cuyo error medio es de $\pm 1\text{m}$ (Lemoine et. al, 1998) en el cálculo de las ondulaciones geoidales. Recientemente, fue divulgado el EGM08 el mismo que está disponible libremente para su uso.

La mayoría de software comerciales para procesamiento de datos GPS (Global Positioning System), para transformar alturas elipsoidales a alturas ortométricas, usan el EGM96.

En este trabajo, se evaluó las ondulaciones geoidales, obtenidas con el modelo geopotencial EGM96 y el EGM08. Para lo cual se obtuvieron datos provenientes de la nivelación geométrica y GPS de precisión para calcular la ondulación geoidal y posteriormente que sirvan como puntos de control para la evaluación de los modelos geopotenciales.

2. MARCO TEORICO

Dentro de la geodesia física, el estudio del geopotencial es una teoría esencial para el mejor entendimiento de la forma de la Tierra, como también es necesaria para el análisis de las mediciones gravimétricas y su significado. El geopotencial en cualquier punto, en coordenadas cartesianas geocéntricas, en la rotación de la Tierra verdadera se expresa de la siguiente forma (Heiskanen & Moritz, 1967):

$$W(x,y,z)=V(x,y,z)+\Phi(x,y,\theta) \quad (01)$$

Siendo

V el potencial gravitacional

Φ el potencial centrífugo

Aplicando el operador De Laplace (Δ) al potencial gravitacional V (ecuación 02) en el exterior de la superficie terrestre, se cumple que: $\Delta V = 0$, esto es, V es una función armónica, y puede ser desenvuelta en términos de armónicos esféricos expresado en el punto P mediante coordenadas polares por la distancia geocéntrica r , co-latitud geocéntrica θ , y longitud λ (Rapp & Pavlis, 1990) por:

$$V(r,\theta,\lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=-n}^n C_{nm} Y_{nm}(\theta,\lambda) \right] \quad (02)$$

donde:

GM es la constante gravitacional geocéntrica;

a es el semieje mayor del elipsoide de referencia;

C_{nm} son los coeficientes plenamente normalizados de grado n y orden m , del potencial gravitacional desenvuelto en armónicos esféricos;

Y_{nm} son los armónicos esféricos de superficie plenamente normalizados.

De forma similar o potencial centrífugo es:

$$\Phi = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \text{sen}^2 \theta \quad (03)$$

Siendo ω la velocidad de rotación de la Tierra

2.1 EARTH GRAVITATIONAL MODEL 1996 – EGM96

Es un modelo geopotencial de la superficie terrestre constituido de la suma de armónicos esféricos de hasta 360 en orden y grado desarrollado mediante la colaboración de distintos centros de investigación, fundamentalmente la NASA, (acrónimo de National Aeronautics and Space Administration) a través del Centro de vuelo espacial Goddard (GSFC), sumando esfuerzos con la Agencia Nacional de Mapeo e Imágenes (NIMA por sus siglas en inglés hoy llamado NGA National Geospatial Intelligence Agency), la Universidad del Estado de Ohio en Estados Unidos (OSU), y la Universidad de Texas at Austin. Para su elaboración se obtuvo datos de gravedad de diferentes partes del mundo continental y oceánica; y de datos de diferentes misiones satelitales.

2.2 EARTH GRAVITATIONAL MODEL 2008 – EGM08

El modelo geoidal agrupa a las ondulaciones geoidales para tener un solo compendio de datos de distintos puntos, dentro de una misma zona, es así que el *Earth Gravitational Model 2008 (EGM08)* contiene esféricos armónicos al grado y orden 2159, además de contener también coeficientes adicionales extendidos al grado 2190 y orden 2159.

El *EGM08* incorpora también anomalías de la gravedad, obtenidas cada 5'x5' (9.26 x 9.26 km. aproximadamente), empleando algoritmos que calculan anomalías de gravedad por área media, esto minimiza efectos aleatorios durante el proceso de análisis armónico, haciendo también un énfasis especial en la calibración del error en cuanto a la estimación del modelo. Incluye también como modelo de referencia al *Dynamic Ocean Topography (DOT)*, que toma en cuenta elevaciones y depresiones oceánicas

2.3 ONDULACIÓN GEOIDAL

La ondulación geoidal o altura geoidal η es la distancia existente entre la superficie del geoide y la superficie del elipsoide. Ésta ondulación, también puede ser calculada de acuerdo a la ecuación (04).

$$(04) \quad \eta = h - H_n$$

Donde:

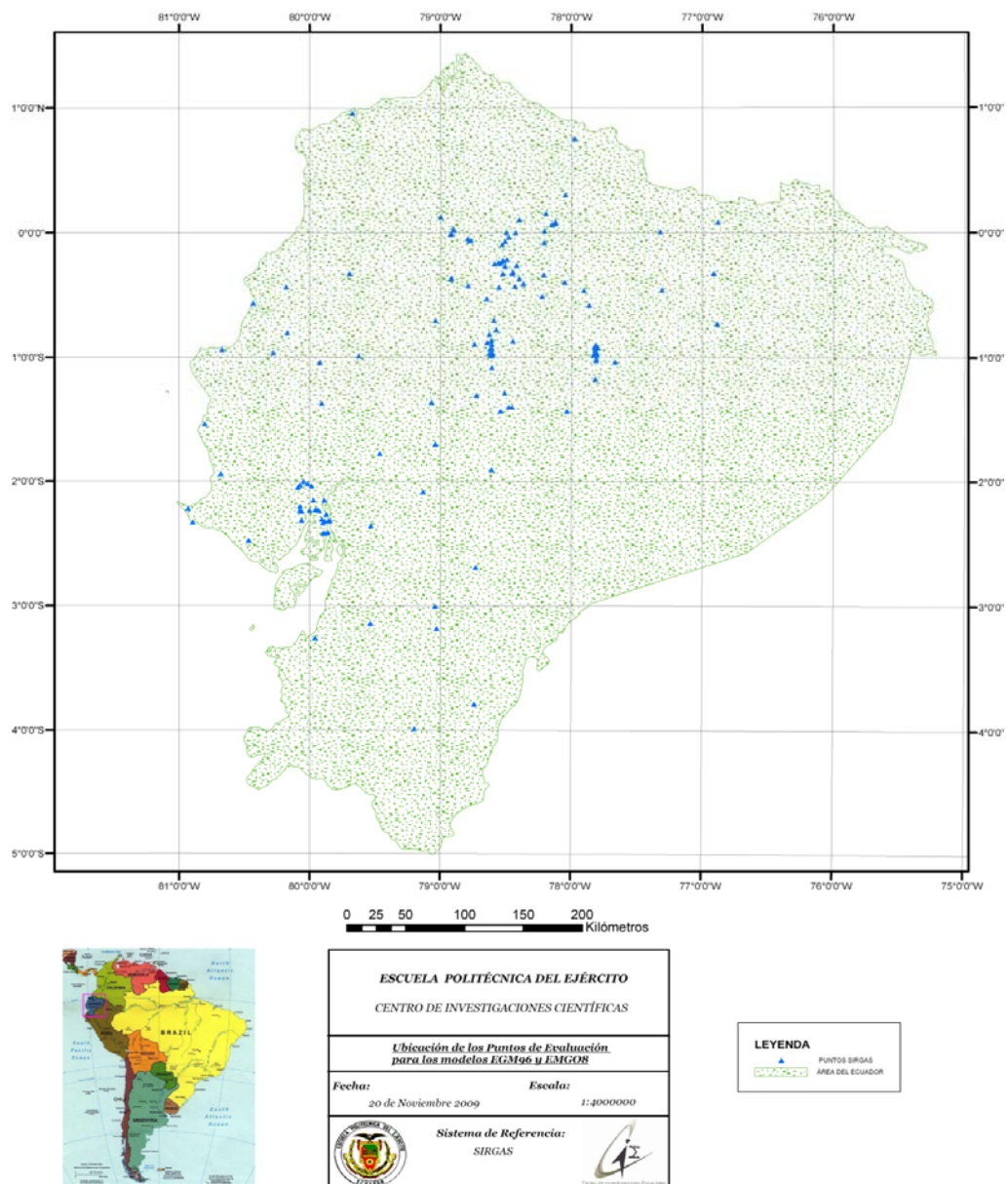
h es la altura elipsoidal medida desde el punto ubicado en la superficie terrestre hasta el elipsoide de referencia

H_n es la altura nivelada a partir del datum vertical hasta la superficie terrestre

La altura elipsoidal, actualmente es posible ser calculado usando tecnología satelital como es el caso del GPS (Global Positioning System), por lo tanto el elipsoide de referencia es el WGS84 (World Geodetic System 1984). Mientras que la altura nivelada es obtenida mediante la nivelación geométrica y está referida al datum vertical La Libertad.

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para realizar la evaluación de los EGMs para el Ecuador, se utilizaron 144 puntos distribuidos de acuerdo al mapa 1. En cada uno de estos puntos, se dispone del valor de la altura nivelada, y de la altura elipsoidal que fue obtenida mediante GPS de precisión.



Mapa 1. Puntos de control para la evaluación de los modelos EGM96 y EGM08

En los puntos de evaluación fue calculada la ondulación geoidal de acuerdo a la ecuación (04). En los mismos puntos fueron calculadas las ondulaciones geoidales a partir de los modelos geopotenciales EGM96 y EGM08. En el gráfico 01, se puede observar las diferencias obtenidas en la ondulación geoidal tanto para el EGM96 (DIFEGM96) como para el EGM08 (DIFEGM08) comparada con las obtenidas con GPS y nivelación geométrica.

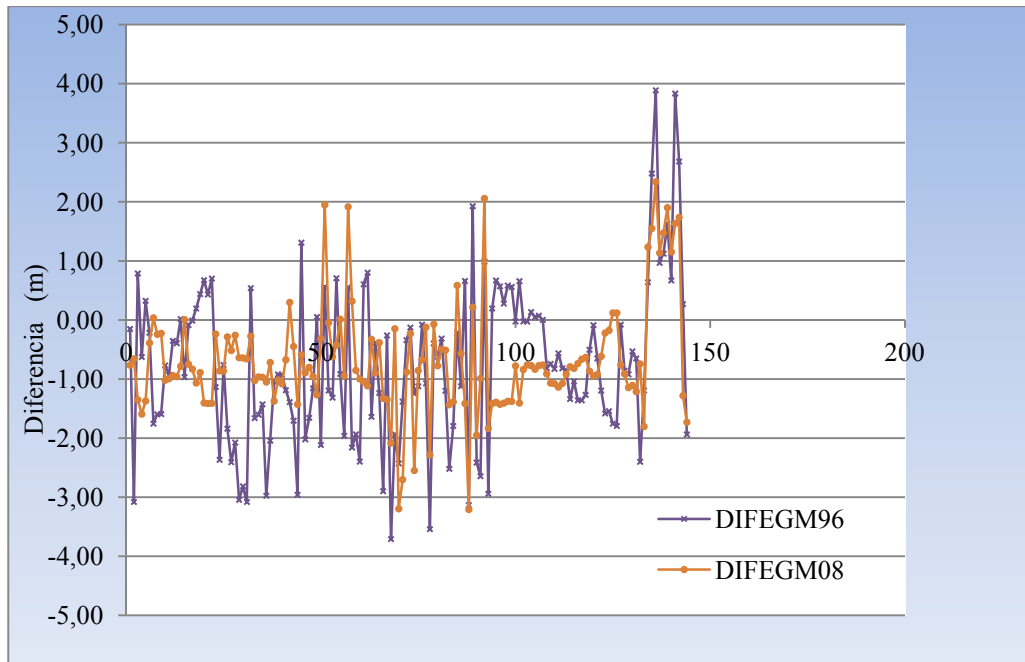


Gráfico 01. Diferencias obtenidas en las ondulaciones geoidales con el EGM96 y EGM08

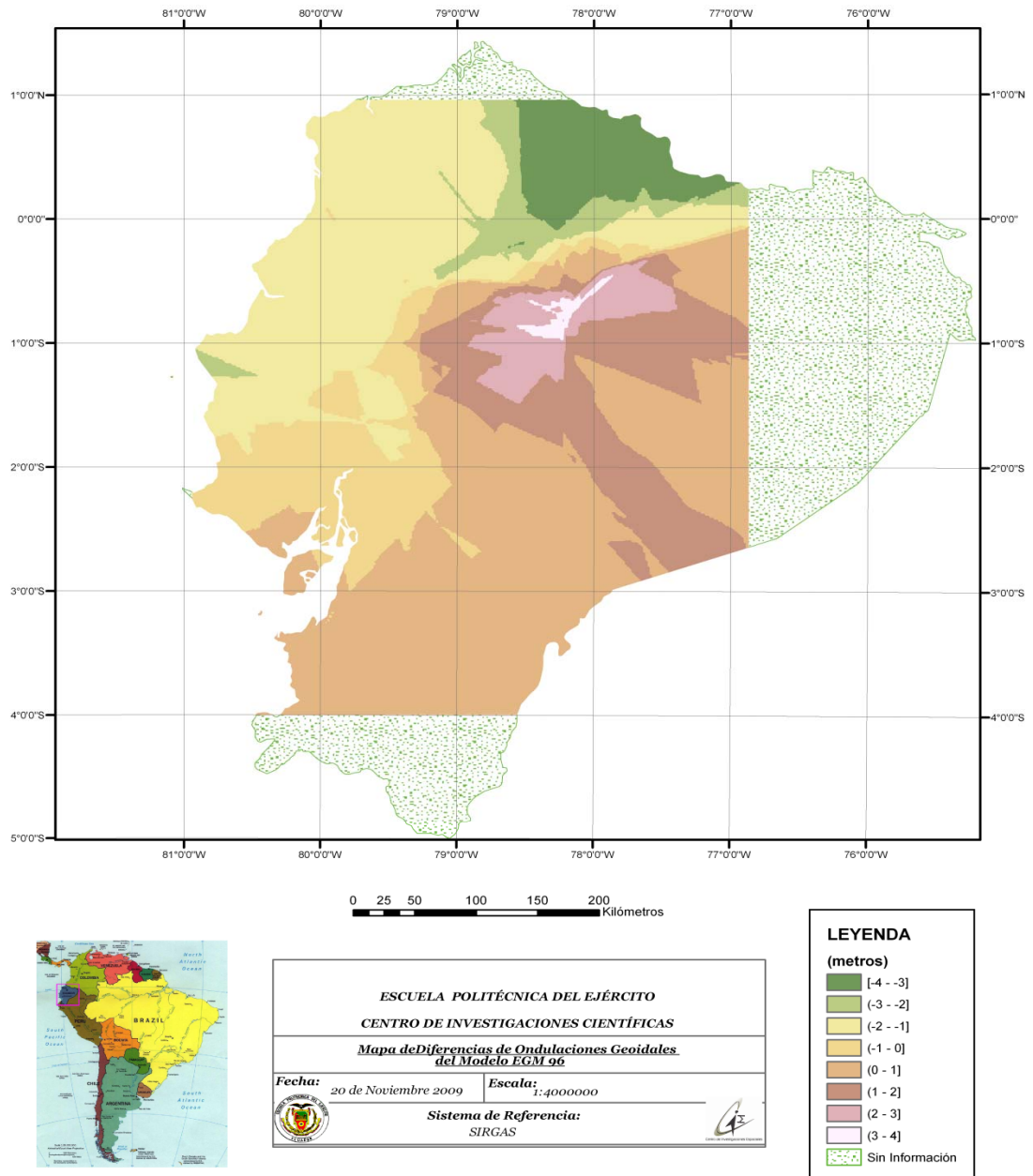
En la Tabla 01, se puede observar, los resultados de la diferencia, obtenidos de la comparación realizada, a través de la media aritmética, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos.

Tabla 01. Resultados de las diferencias obtenidas con los EGMs

	Modelo EGM96	Modelo EGM08
Media Aritmética (m)	-0.75	-0.68
Desviación Estándar (m)	1.35	0.93
Valor Mínimo (m)	-3.71	-3.21
Valor Máximo (m)	3.89	2.34

Observando, el gráfico 01 y la tabla 01, se puede indicar que el EGM08 presenta una mejoría en el cálculo de las ondulaciones geoidales comparado con el EGM96. La variabilidad de las diferencias en el EGM96 es de 7.6 m, mientras que del EGM08 es de 5.55 m. El 50% de los puntos de evaluación tienen diferencias menores a 1 m cuando calculado la ondulación geoidal con el EGM96, mientras que, para el EGM08 son el 59%. El 22% de los resultados son menores a 50 cm para el EGM96 y 19% para el EGM08.

En el mapa 2 y en el mapa 3, se presentan para el Ecuador Continental las diferencias en las ondulaciones geoidales que se pueden obtener cuando utilizo el modelo EGM96 y EGM08 respectivamente.

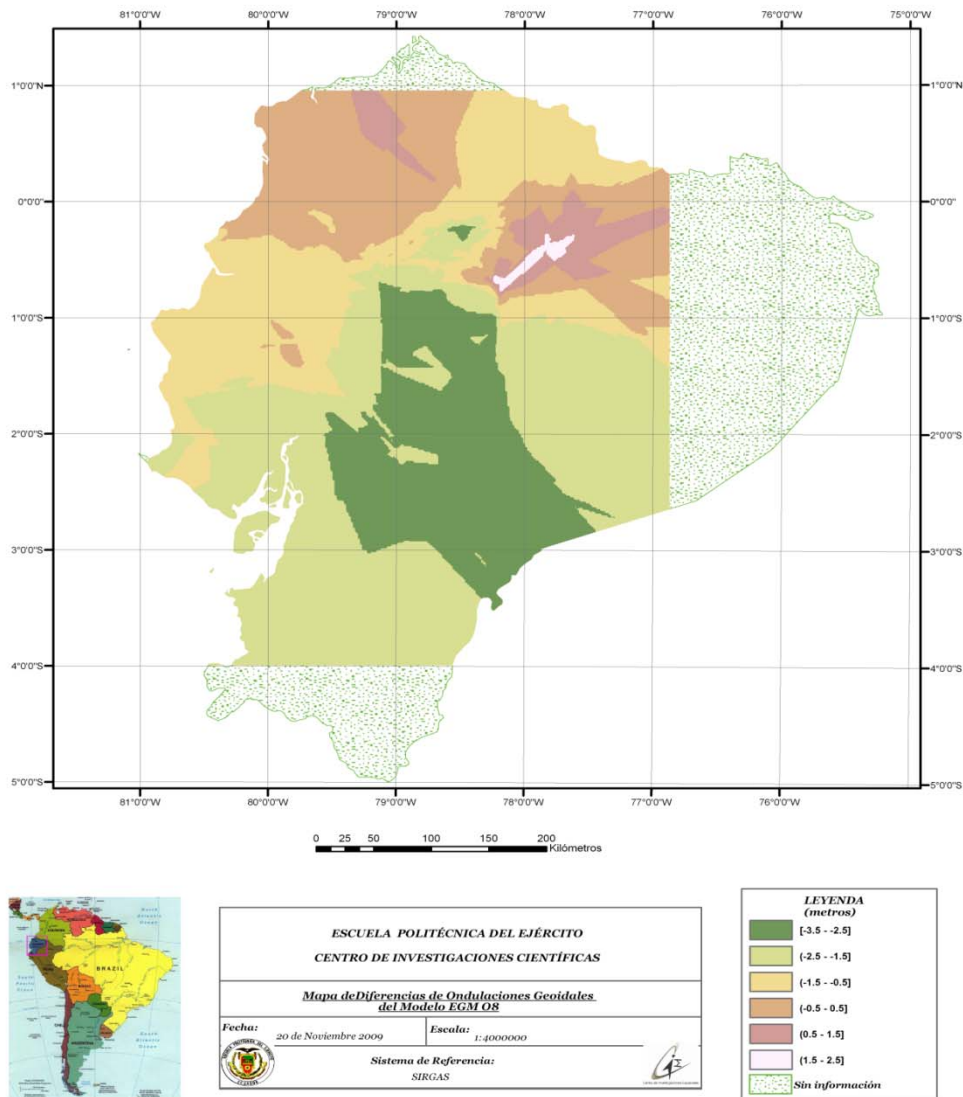


Mapa 2. Diferencias en las ondulaciones geoidales para el modelo EGM96

Conociendo un modelo geoidal para el cálculo de las ondulaciones geoidales (caso del EGM96 o EGM08) y la altura elipsoidal (e.g cuando se usa GPS), se puede calcular la altura nivelada (H_n) a partir de la ecuación (04).

Generalmente, los usuarios que utilizan los sistemas de posicionamiento por satélites en especial los GPS, tienen la opción de calcular la altura nivelada, ya sea en tiempo real o en pós-proceso. Pero, cuando no se dispone de un modelo geoidal con buena precisión, como es el caso del Ecuador, es común utilizar actualmente el EGM96. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, y mirando los mapas, se puede indicar que, dependiendo del área en

donde va utilizar GPS y luego determinar alturas niveladas, se alcanza errores en altura (cota) hasta 4 m cuando utilizo el EGM96 y 3.5 m para el EGM08.



Mapa 3. Diferencias en las ondulaciones geoidales para el modelo EGM08

Recomendando, a los usuarios de GPS cuando utilizan los modelos EGM consideren estos errores que se pueden obtener. Puesto que, si bien realizan posicionamiento con GPS con buena precisión, pero al calcular la altura nivelada con el EGM pierden toda la precisión vertical alcanzada con GPS, lo que perjudicaría en productividad y calidad del trabajo, en especial de la coordenada vertical.

4. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se puede indicar lo siguiente:

- El modelo EGM08 para el cálculo de las ondulaciones geoidales presenta una mejoría respecto al modelo EGM96.
- Para el área de Ecuador, tanto el EGM96 como el EGM08, no sería aconsejable utilizar las ondulaciones geoidales calculadas con estos modelos, principalmente cuando es necesario transformar las alturas elipsoidales, obtenidas con GPS, a alturas niveladas y cuando los errores permitidos en los diferentes aplicaciones sean menores a 4 m. O dependiendo de la zona en que estén realizando los trabajos, se pueden ayudar con los mapas presentados, para estimar el error alcanzado con los modelos EGMs.

REFERENCIAS

- Seeber G., *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, New York, 1993.
- Galera J., *Posicionamiento pelo NAVSTAR-GPS. Descrição, Fundamentos e Aplicações*. UNESP, Sao Paulo, 2000
- Hofmann B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System, Theory and Practice*. Springer-Verlag, New York, 1993.
- Verhagen S., Le A. Electronic Resources on European Satellite Navigation System GALILEO. *GPS WORLD*, 7, 203-205, 2003.
- Gibbons, G. Interoperable World. *Inside GNSS*. Vol 3, nº 6, 2008
- Wells D. *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, 1987.
- Zakatov P., *Curso de Geodesia Superior*. MIR, URSS, 1981.
- Torge W. *Geodesia*. Diana, México, 1983.
- Heiskanen M., Moritz H. *Physical Geodesy*. W.H. Freeman, 1967.
- Lemoine F. *The Development of the Joint NASA and the NIMA, Geopotential Model EGM96*- NASA/TP, USA, 1998.
- Pacino, M. *Geoide y Estructura Litosférica en la Argentina*. Tesis de Doctorado en Ingeniería, UNR, 1999
- Pavlis, N; Holmes, A; Kenyon, S; Factor, J. **An Earth Gravitational Model to Degree 2160:EGM08**, National Geospatial-Intelligence Agency, USA, 2008.
- Smith D., Lerch F., Marsh J., Wagner C., Kolenkiewicz R., Khan M. Contribution to the national geodetic satellite program by Goddard Space Flight Center. *J. Geophysics Research*. 81, 1006-1026, 1976.
- Reigber C., Balmino G., Moynot B., Muller H. The GRIM3 Earth Gravity Field Model. *Manuscripta Geodaetica*. 8, 93-138, 1983
- Rapp R., Pavlis N., The Development and Analysis of Geopotential Coefficient Models to Spherical Harmonic Degree 360. *J. Geophysics Research*, 95, 885-911, 1990.
- Jamur K., De Freitas. **Análise Qualitativa dos Modelos Geodais Globais EIGEN CG01C, EIGEN CG03C e Modelos Regionais para o Estado do Paraná**. V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 83-90, 2007