

# Sistema de Alturas para el Ecuador

E. C. Canizares; A. R. Tierra y C. A. Leiva

Grupo de Investigación Geoespacial  
Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE  
Avenida Gral. Rumiñahui s/n  
Sangolquí, Ecuador  
eccarolina.c@gmail.com, artierra@espe.edu.ec,  
caleiva@espe.edu.ec,

S. A. Staller y J. L. G. Pallero

ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía  
Universidad Politécnica de Madrid  
Avenida del Mediterráneo, km 7.0, 28031  
Madrid, España  
a.staller@upm.es, jlg.pallero@upm.es

**Resumen**— El correcto establecimiento, observación, cálculo y compensación de la red vertical que materializa el sistema de alturas en un país son tareas de importancia práctica fundamental para el desarrollo económico y social del territorio. Tradicionalmente, uno de los sistemas de alturas más utilizado en la práctica es el denominado *sistema de alturas 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 alturas ortométricas de Helmert en la Red de Control Básico Vertical del Ecuador. Para ello, se ha llevado a cabo el procesamiento de las observaciones de nivelación geométrica y de gravedad de dos polígonos, dando así el primer paso en dirección al futuro trabajo de ajuste global de la Red de Control Básico Vertical del Ecuador.

**Palabras Clave**— Nivelación geométrica, altura ortométrica de Helmert, gravedad, superficie equipotencial, geoides y elipsoide.

**Abstract**— The correct establishment, observation, calculus and compensation of a vertical network, which materializes a height system in a country, are important and basic assignments for an economic and social development of that territory. Traditionally, one of the most common used height systems on practice has been the orthometric height system. A coordinate referred to this system is defined by the plumb line that belongs to its place of observation. Therefore, this study is a first approach of the estimation of the Helmert orthometric height of two polygons that belong to the Vertical Network of Ecuador. Consequently, measurements of geometric levelling and gravity were necessary. As a result, the first step for an upcoming global adjustment of the whole Vertical Network is made.

**Keywords**— Geometric levelling, Helmert orthometric height, gravity, equipotential surface, geoid and ellipsoid.

## I. 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 en alturas niveladas únicamente, cuyo Datum Vertical se ubica en el mareógrafo de La Libertad, provincia de Santa Elena, y su determinación fue iniciada desde 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 sumiendo 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, es 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 altura del punto de nivelación respecto del camino de nivelación genera una indeterminación que no es admisible en nivelación de alta precisión, por lo que en redes que abarquen territorios amplios, es necesario corregirla [3].

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### A. Superficies de Referencia

Las superficies de referencia manejadas en Geodesia son fundamentalmente tres: la superficie física o topográfica, sobre la cual se realizan las mediciones, la superficie de un modelo matemático, conocido como elipsoide, y el geoides [4]. Esta última superficie es sobre la cual se refieren los sistemas de alturas ortométricas.

El modelo matemático de la Tierra utilizado en cálculos geodésicos es un elipsoide de revolución, generado por la rotación alrededor de su eje menor [5]. El elipsoide se encuentra caracterizado por cinco constantes geométricas:  $a$  (semieje mayor),  $f$  (aplanamiento) y  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  (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  $\omega$  (velocidad angular de rotación de la Tierra) [6].

El geoides en cambio, es la superficie equipotencial del campo potencial 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 alturas 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 geoides con

respecto al punto o puntos fundamentales de referencia de una red estatal.

Pero debido a que la figura del geoide depende de la distribución de las masas en el interior de la Tierra, desconocida por nosotros; rigurosamente hablando, es indeterminable. Así lo demostró M.S. Molodensky, quien propuso que la tarea fundamental de la Geodesia es el considerar el estudio de la figura real de la Tierra y su campo gravitacional [7].

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 geoidal o altura 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 alturas sobre el elipsoide, determinadas por técnicas GNSS, en alturas ortométricas.

### B. Tipos de alturas

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 altura del punto [3].

La altura de un punto sobre 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. En un proceso convencional de determinación de alturas 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 aquellas superficies [2]. Generalmente, el geoide es aceptado como la superficie equipotencial de referencia para los sistemas de alturas [5]. Pero, como se explicó 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 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 geométrica exigen el conocimiento de valores de la gravedad para la corrección de los desniveles observados [4].

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

### C. Alturas Geométricas

Las alturas niveladas y las alturas elipsoidales son consideradas alturas de tipo geométrico. Las alturas niveladas son obtenidas bajo proceso de nivelación geométrica, en el cual se observa los desniveles o distancias existentes entre las superficies equipotenciales del campo de gravedad terrestre. Las alturas elipsoidales, por su parte, representan la separación entre la superficie topográfica y el elipsoide, y son calculadas sobre la línea normal a la superficie del al elipsoide [2]. Este tipo de alturas son obtenidas directamente a partir de observaciones GNSS.

### D. Alturas Físicas

Los valores de desnivel obtenidos en una nivelación pueden ser transformados a diferencias de potencial tomando 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, al ser sumadas en un circuito cerrado serán siempre cero, ya que los valores de potencial son unívocos y depende 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 que indica (1)

$$\int_0^A g \, dn = W_0 - W_A = C \quad (1)$$

Siendo  $W_A$  y  $W_0$  los potenciales gravitatorios para un punto A y para el geoide, respectivamente,  $g$  la gravedad,  $dn$  el desnivel y  $C$  la cota geopotencial. La unidad de la cota geopotencial es el kgal\*m, llamada también unidad geopotencial (u.g.p). El valor de C es constante a lo largo de una superficie equipotencial [9].

Si a la cota geopotencial se lo divide para un valor de referencia de la gravedad normal,  $\gamma_{cte}$ , considerada generalmente como el valor de la gravedad a los 45° de latitud [10], es posible conocer la altura dinámica, mediante (2)

$$H^{din} = \frac{C}{\gamma_{cte}} \quad (2)$$

Ahora, si a la cota geopotencial se la divide para un valor medio de gravedad entre el punto evaluado y el geoide, a lo largo de la línea de la plomada, lo que se obtiene es la altura ortométrica [2], a partir de (3)

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

Según el modo de estimación de la gravedad media  $\bar{g}$ , en (3), es posible encontrarse ante distintos subtipos de alturas ortométricas. En este trabajo se utilizará las denominadas alturas ortométricas de Helmert, cuyo cálculo se detallarán más adelante.

Y finalmente, se define el concepto de altura 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 éste último [2], como lo indica (4)

$$H^{nor} = \frac{C}{\bar{\gamma}} \quad (4)$$

## III. METODOLOGÍA

El primer paso para realizar el cálculo de las alturas ortométricas 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 observada.

En 1948 el IGM, con el asesoramiento y la colaboración del entonces IAGS (Interamerican Geodetic Survey), instalaron un mareógrafo en el terminal petrolero de La Libertad, provincia de Santa Elena [11]. El punto de partida al que se refirieron las alturas que el IGM transportó por las principales carreteras y a casi todas las ciudades del país mediante nivelación geométrica, es 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 función de la nomenclatura manejada por el IGM, los anillos seleccionados para el estudio fueron: I, II, III, IV, VIII, IX, X y XII, conformados por las siguientes líneas de nivelación: 460, 462, 450, 461, 446, 501, 484, 409, 478, 481, 479, 483, 476, 470, 467, 454 y 468. La longitud máxima existente de dichas líneas de nivelación es de 189,16 km y la mínima de 3,03 km.

Cabe recalcar que las líneas de nivelación seleccionadas han sido observadas desde el año 1990 hasta 2008. Los equipos empleados para la nivelación geométrica han sido niveles geodésicos de precisión que garanticen el cierre tolerable por el IGM. Dicho criterio de tolerancia es de  $4\text{mm}\sqrt{K}$ , donde  $K$  representa la longitud de la línea nivelada en km.

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. El equipo empleado para la observación gravimétrica es el gravímetro Lacoste & Romberg, modelo G, y la incertidumbre considerada por el IGM es de 0.05 mGal.

Los anillos mencionados fueron necesarios para la creación de un nuevo anillo de nivelación propio para el estudio. Éste anillo atraviesa por las provincias de Santa Elena, Guayas, Manabí, Santo Domingo de los Colorados, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo y Cañar. El objetivo de haberlo formado fue estudiar las alturas que representan la diversa orografía del país, como la Cordillera de los Andes, regiones interandinas y planicies costeras.

De esta manera las alturas consideradas se encuentran entre los 3600 msnm y 2 msnm. A partir de esta consideración, para el cálculo y ajuste de las alturas ortométricas de Helmert, se trabajó con toda la información perteneciente al anillo I y al anillo conformado, representados en la fig. 1. Con esto, el propósito es contar con una primera aproximación al ajuste de toda la Red de Control Básico Vertical del Ecuador.

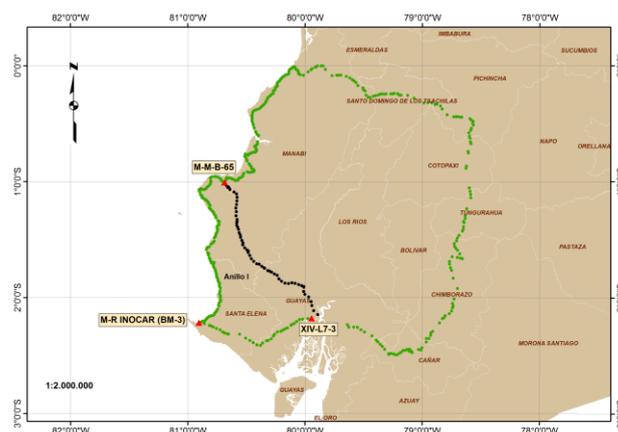


Fig. 1. Mapa del anillo de nivelación

A continuación, se generó una base de datos de todos los puntos. Con esto, fue posible realizar la validación de la información, mediante el análisis del error de cierre de los desniveles observados para cada una de las líneas de nivelación en estudio.

Una vez validada la información se realizó el cálculo de las alturas niveladas, que servirán como datos de partida para el posterior ajuste. Para este caso se emplearon los datos de desniveles de ida y de vuelta de cada punto de las líneas de nivelación, como lo indica (5)

$$H_b = \frac{\Delta n_b^a - \Delta n_a^b}{2} + H_a \quad (5)$$

Donde  $\Delta n_b^a$  representa el desnivel observado desde el punto  $a$  hacia  $b$ ,  $\Delta n_a^b$  es el desnivel observado desde  $b$  hacia  $a$ ,  $H_a$  es la altura nivelada en el punto  $a$  y  $H_b$  es la altura nivelada en el punto  $b$ .

Para obtener alturas de tipo físico, es necesario realizar el cálculo de las diferencias de potencial entre los puntos observados a lo largo del mismo itinerario de nivelación, a través de (6)

$$\Delta C_b^a = \frac{g_a + g_b}{2} \Delta n_b^a \quad (6)$$

Donde  $g_a$  y  $g_b$  representan el valor de gravedad medida en un punto  $a$  y  $b$  sobre la superficie topográfica, respectivamente, y  $\Delta C_b^a$  es la diferencia de potencial de  $a$  hacia  $b$ . Cabe recalcar que los puntos que no contaban con gravedad fueron excluidos del análisis, uniéndose entre sí los puntos que sí contaban con gravedad. La línea 470 fue la más afectada, ya que el 96% de sus puntos no disponen de gravedad observada, en tanto que la línea 642 fue la menos afectada, con el 10% de puntos sin mediciones de gravedad.

A partir del anillo en estudio, se definieron cuatro líneas de nivelación para el análisis de los errores de cierre de cada una de ellas, como se indica en la fig. 2.



Fig. 2. Mapa de las líneas de nivelación del anillo en estudio

La tabla I contiene los valores que fueron obtenidos una vez que se calculó el error de cierre de los desniveles observados de las cuatro líneas de nivelación. Se detectó que los errores de cierre de la línea L2 y L4 superan al valor de tolerancia.

TABLA I. ERRORES DE CIERRE DE LOS NODOS DE LÍNEAS DE NIVELACIÓN

Línea	Punto de Partida	Punto de Llegada	Error de cierre (mm)	Tolerancia (mm)
L1	BM-3	M-M-B-65	0,20	59,44
L2	M-M-B-65	XIV-L7-3	-63,30	54,81
L3	XIV-L7-3	BM-3	-42,20	46,24
L4	M-M-B-65	XIV-L7-3	183,52	126,14

Detectados los errores de cierre, se calcularon los valores de las cotas geopotenciales de cada punto de las líneas de nivelación, a partir de las diferencias de potencial obtenidas previamente, como se indica en (7)

$$C_b = \frac{\Delta C_b^1 - \Delta C_b^2}{2} + C_i \quad (7)$$

Para el ajuste de las cotas geopotenciales se consideró únicamente a los tres nodos (BM-3, M-M-B-65 y XIV-L7-3) de intersección de las cuatro líneas de nivelación. Dicho ajuste fue realizado mediante el método de mínimos cuadrados, empleando el software Octave versión 3.8.2<sup>1</sup>, siendo los datos de entrada los que se indican en la tabla II.

TABLA II. DATOS DE ENTRADA PARA EL AJUSTE

Línea	Punto de Partida	Punto de Llegada	Longitud (km)	Diferencia de Cota Geopotencial (u.g.p)
L1	BM-3	M-M-B-65	220,825	93,0412
L2	M-M-B-65	XIV-L7-3	187,775	-91,0158
L3	XIV-L7-3	BM-3	133,640	-2,0700
L4	M-M-B-65	XIV-L7-3	994,436	-90,9647

<sup>1</sup>Información del software disponible en: <http://www.gnu.org/software/octave/>

La gravedad media, a lo largo de la línea de la plomada entre el geode y el punto de trabajo, puede ser obtenida mediante diversos métodos de reducción. En este caso, se consideró el método de reducción Poincaré y Prey, lo que da lugar a la obtención de las denominadas alturas ortométricas de Helmert. La gravedad media, por el método de reducción de Poincaré y Prey, se determina mediante (8)

$$\bar{g} = g + 0.0424H \quad (8)$$

Donde  $\bar{g}$  es la gravedad medida en la superficie topográfica,  $H$  es la altura ortométrica 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 geode. Dicho factor es válido para la densidad normal 2,67 g/cm<sup>3</sup> [9].

Reemplazando (8) en (3) se tiene (9)

$$H^{ort} = \frac{C}{\bar{g} + 0.0424H} \quad (9)$$

Es importante tomar en cuenta que las unidades de (9) son, u.g.p para la cota geopotencial  $C$ , Gales para  $\bar{g}$  y km para altura ortométrica  $H$ . La expresión (9) puede reformularse como una ecuación de segundo grado, a partir de la cual se despeja el valor de  $H^{ort}$ .

Adicionalmente, se realizó el cálculo de la ondulación geoidal para 65 puntos distribuidos en las líneas de nivelación cercanas a la costa del Océano Pacífico, empleando las alturas ortométricas ajustadas y las alturas elipsoidales observadas por el IGM, mediante el criterio de (10)

$$n = h - H \quad (10)$$

En donde  $n$  representa la ondulación geoidal y  $h$  la altura referida al elipsoide.

Para tener un segundo criterio sobre las ondulaciones geoidales de los puntos del anillo en estudio, se obtuvieron también las ondulaciones geoidales a partir del Modelo de Ondulación Geoidal EGM08, con una malla interpolación de 1x1 minuto.

#### IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados que fueron obtenidos a partir del ajuste por mínimos cuadrados se indican en la tabla III.

TABLA III. COTAS GEOPOTENCIALES AJUSTADAS Y SIN AJUSTAR

Punto	Cota Geopotencial Sin Ajustar	Cota Geopotencial Ajustada
M-M-B-65	8,1588	8,1939
XIV-L7-3	99,1746	99,1903

Y con esto, la tabla IV indica las alturas ortométricas sin ajustar y ajustadas de 12 puntos distribuidos a lo largo de todo el anillo conformado para el estudio.

TABLA IV. ALTURAS ORTOMÉTRICAS AJUSTADAS Y SIN AJUSTAR

Punto	Altura Ortométrica Sin Ajustar (m)	Altura Ortométrica Ajustada (m)	Diferencia (m)
SIRGAS LIBERTAD	5,3575	5,3577	-0,0002
L-M-1	12,1658	12,1660	-0,0002
L-M-2	10,1054	10,1057	-0,0003
B-SV-J-3	9,3188	9,3157	0,0031
B-SV-J-4	61,6520	61,6488	0,0032
VII-L1-15	291,8231	291,8142	0,0089
VII-L1-14	307,9063	307,8974	0,0089
XI-L-3-39	3195,3439	3195,3318	0,0121
XI-L-3-40	3167,1605	3167,1483	0,0122
XI-L-3-44	3524,5899	3524,5777	0,0122
G-S-33	63,9323	63,9505	-0,0182
G-S-34	100,2267	100,2460	-0,0193

Un aspecto muy importante es el análisis de las diferencias obtenidas entre la altura conocida del punto de partida (BM-3) y la altura obtenida del mismo punto a partir del arrastre de desniveles para alturas niveladas y de diferencias de potencial para alturas ortométricas. En este caso, se analizó dicha diferencia tanto para el anillo I como para el todo el anillo conformado para el estudio, representados en la fig. 2. Los resultados se indican en la tabla V.

TABLA V. ERRORES DE CIERRE DEL ANILLO DE NIVELACIÓN

Anillos	Diferencia de Alturas Niveladas (cm)	Diferencia de Alturas Ortométricas (cm)
Anillo I	1,255	4,550
Anillo conformado para el estudio	5,781	0,666

Los resultados obtenidos en cuanto a la ondulación geoidal a partir de (10), fueron comparados con los valores obtenidos por el modelo EGM08. Con esto, en la tabla VI se indica parte de los resultados para 10 de los 65 puntos analizados.

TABLA VI. DIFERENCIAS DE ONDULACIÓN GEOIDAL

Punto	Ondulación Geoidal ESPE (m)	Ondulación Geoidal EGM08 (m)	Diferencia (m)
BM-3	11,748	11,234	0,514
L-M-3	11,876	11,517	0,359
L-M-7	12,448	11,831	0,617
L-M-50	15,160	14,769	0,391
L-M-57	14,909	14,564	0,345
L-M-60	14,700	14,615	0,085
L-M-64	14,864	14,366	0,498
M-M-B-41	13,427	12,859	0,568
M-M-B-45	13,722	13,329	0,393
M-M-B-48	13,847	13,476	0,371

La diferencia entre la ondulación geoidal calculada en el estudio y la obtenida por el modelo EGM08 se encuentra entre un máximo de +/-0,95 m y un mínimo de +/-0,09 m. Sin

embargo es importante tomar en cuenta que el EGM08 es un modelo global y que su adaptación a la zona de estudio puede resultar no muy próxima a la realidad.

## V. CONCLUSIONES

Existen ciertas líneas de nivelación que su error de cierre fue superior al valor tolerable, sin embargo el cierre de los anillos a los que pertenecen sufren una compensación por las líneas que sí entran en tolerancia. Es importante tomar en cuenta posibles factores que inciden sobre las líneas que no entran en tolerancia, sin importar si el anillo que las conforman estén o no dentro de tolerancia.

Los resultados indicados en la tabla V demuestran que el cierre obtenido a partir de diferencias de potencial para el anillo I es superior al obtenido con desniveles observados. Este efecto puede estar influenciado, en primer lugar, por tratarse de un anillo integrado por la línea L2. La línea L2 posee un error de cierre de los desniveles observados superior al valor tolerable, como se indicó en la tabla II, por lo que debe estudiarse más a fondo sus posibles causas. Y en segundo lugar, cerca del 94% de los puntos de la línea 468, perteneciente a la misma línea L2, no cuentan con observaciones de gravedad. Por lo tanto, las mediciones obtenidas mediante nivelación geométrica de la línea L2, y por ende del anillo I, continúan influenciadas por el efecto del campo de gravedad, manteniendo errores que no están siendo corregidos. Sin embargo, el ajuste global, del anillo conformado para el estudio, posee un cierre de alturas ortométricas mucho mejor que el obtenido con alturas niveladas. Puede plantearse entonces la posibilidad de eliminar la línea L2 para un futuro ajuste, en el caso de que los errores mencionados no logren ser corregidos.

Finalmente, este trabajo ha sentado bases para posteriores ajustes que puedan aplicarse sobre la Red de Control Básico Vertical. Sin embargo, se debe tomar muy en cuenta que no todos los datos de entrada, en cuanto a desniveles, cumplen con el criterio de tolerancia establecido por el IGM. Es importante tener presente que las observaciones futuras sean obtenidas considerando el cumplimiento de los estándares, para finalmente poder llegar a mejores resultados y que todo el país maneje información con una mayor precisión altimétrica.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al Instituto Geográfico Militar, por el 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. Sandra Staller y al Ingeniero 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 Alturas 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 Geodey," 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] W.A. Heiskanen y H. Moritz, "Geodesia Física," Instituto Geográfico Nacional, Traducido por M.J. Sevilla. Madrid, 1985.
- [10] N. Yilmaz, "Comparison of different height systems," Taylor and Francis, Geo-spatial Information Science, vol. 11, pp. 209-2014, Septiembre 2008.
- [11] N. Paredes, "Determinación del Datum Vertical en La Libertad, Ecuador," Acta Oceanográfica del Pacífico, vol. 3, Instituto Oceanográfico de la Armada, 1986.
- [12] Instituto Oceanográfico de la Armada, "Ficha de Descripción," Departamento de Hidrografía, División de Geodesia y Topografía, Guayaquil, Marzo 2010.

- Obtenido de  
<http://www.monografias.com/trabajos12/conta/conta.shtml>
- Monsalve Sáenz, G. (2009). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
  - Peralta, S. (2007). *levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Uramaco*. Uramaco, Estado Falco, Venezuela: Universida Simón Bolívar.
  - Sánchez Pachón, C. (10 de 02 de 2003). Principios Actuales en la Caracterización de suelos Contaminados en los Estados Unidos. *IGME, Madrid*, 201 - 206. Obtenido de [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2\\_th/lib106/pdf/lib106/in\\_6.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_th/lib106/pdf/lib106/in_6.pdf)
  - Sanchez San Roman, F. J. (2010). *Hdrología*. Salamanca: <http://web.ususl.es/javisan/hidra>.
  - Sanders, I. (1998). *A manual of field hidrogeology*. Michigan: Prentice Hall.
  - Sanz Pérez, E., & Menéndez Pidal, I. (2014). *Hidráulica Subterránea*. Madrid: IBERGARCETA PUBLICACIONES.
  - Schlumberger. (2005). *User's manual, Visual MODFLOW Premium v.4.3. Dynamic Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling Software*. Ontario: Schlumberger Water Services.
  - Schlumberger. (2009). *The Waterloo Training Course Series. Applied Grandwater Flow & Contaminant Trnaspport Modeling using MODFLOW-2000, MODPATH, Zonebudget, MT3D & WinPEST*. Costa Rica: Schlumberge Water Services.
  - Schlumberger Water, s. (2009). Ejercicio de laboratorio paravisual MODFLOW 2009.1. Intro Flujo de agua subterránea y transporte de contaminantes.
- Chen West, the flow model, the transport model*, 85.
- slideshare. (05 de 08 de 2013). *Kps hidróxidos metales pesados*. Obtenido de <http://slideshare.net/adriandsiera/tablas-de-constantes-de-productos-de-solubilidad>
  - Tobar Martín, R. (17 de 08 de 2011). *Desarrollo y validación de una herramienta de cálculo de riesgo de seulos y aguas contaminados*. Obtenido de Ruhtobar Martin: [http://www.researchgate.net/researcher/36716435\\_Ruth\\_Tobar\\_Martin](http://www.researchgate.net/researcher/36716435_Ruth_Tobar_Martin)
  - Villacreses, L. (2012). *Evaluación del vanadio como indicador de contaminación de origen petrolero*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.
  - Wikipedia. (17 de 08 de 2013). Obtenido de [wikipedia.org/wiki/constante\\_de\\_disocia%C3%83n\\_%A1cida](http://wikipedia.org/wiki/constante_de_disocia%C3%83n_%A1cida). 2013-08-17
  - Wikipedia. (05 de 08 de 2013). *Vanadio wikipedia encilopedia libre*. Obtenido de <http://es.wikipedia.org/wilki/Vanadio>. 2013-08-05
  - *Zona de ingeniería apuntes*. (08 de 06 de 2012). Obtenido de <http://www.entradas.zonaingenieria.com/2012/05/aforo-con-molinete-o-correntometro.htm>