

## Una comparación de diferentes sistemas verticales en Venezuela

Wildermann, E.<sup>1</sup>, Hoyer, M.<sup>1</sup>, Hernández, J.<sup>2</sup>, Velandia, J.<sup>2</sup>, Royero, G.<sup>1</sup>, Acuña, G.<sup>1</sup>, Lopez, M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Geodesia Física y Satelital, La Universidad del Zulia, Maracaibo.

<sup>2</sup>Instituto Geográfico de Venezuela "Simón Bolívar", Caracas.

### Resumen

Los sistemas de referencia vertical actualmente se encuentran en el foco de interés de la comunidad geodésica. Durante la última década, los avances en posicionamiento y la referencia relacionada, especialmente por el uso mundial y permanente del GPS, han logrado grandes avances hacia resultados inmediatos con alta exactitud como la definición del sistema geocéntrico de referencia para Latinoamérica, SIRGAS.

La altura o la componente vertical del sistema siempre ha sido considerada por separado, en parte por problemas o procedimientos de mediciones diferentes y en parte por su relación con propiedades físicas, que escapan de una representación geométrica simple y precisa. Solamente la incorporación de data de diferente índole (nivelación geométrica, gravimetría, GPS, entre otros) y la aplicación de técnicas matemáticas avanzadas como procedimientos de integración y colocación permiten unificar las alturas a un sistema único e uniforme en el país.

El análisis presentado de la situación de alturas en Venezuela considera las cotas con relación al Nivel Medio del Mar, un modelo digital del terreno con resolución 1\*1' para correcciones topográficas y un conjunto de observaciones GPS sobre puntos de la red vertical de primer orden que, por primera vez, permite determinar las relaciones entre los diferentes sistemas en gran parte del país.

Las relaciones en dos perfiles con características específicas para el caso venezolano, uno en zona plana cerca del nivel del mar y otro cruzando las montañas, muestran las diferencias existentes entre los sistemas utilizados que pueden alcanzar hasta 22 cm en magnitud. Procesando la data GPS sobre puntos de nivelación se muestra la posibilidad de definir un sistema uniforme de alturas para el país.

Las conclusiones apuntan en dirección a la necesidad de la actualización o del cambio del sistema de referencia vertical actualmente en uso para permitir controlar o combinar los diferentes tipos de medición en uso, que también puede servir como paso en las labores de unificación de datum verticales en el continente americano.

### Summary

In the geodetic community vertical reference systems are currently at focus of interest. Advances in positioning and related reference systems have been obtained specially due to the global and permanent use of GPS coming up to real time, high precision results. One example of progress is SIRGAS, the geocentric reference definition for Latin America.

Always, heights have been considered separately. This comes partly from problems and different techniques of observation, partly due to connections with physical properties, which escaped simple and precise geometric representations. An unification of heights to a common system can only be achieved by incorporation of different data type (leveling, gravimetry, GPS, etc.) and the application of processing techniques of integration and collocation.

The situation in Venezuela with its heights related to Mean Sea Level is analyzed using a digital terrain model of resolution 1\*1' for topographic corrections and GPS observations over first order leveling Benchmarks. For first time it is possible to determine relations between different systems at the country.

Two leveling circuits showing special characteristics of the Venezuelan case are considered, one situated near to sea level, the other crossing through the Andes mountains show differences up to 22 cm between systems. GPS data over first order leveling Benchmarks distributed over the northern part of the country show an opportunity of defining an unique height system for the country.

Conclusions point towards an actualization or changing of the actually used vertical reference system to control and combine more effectively observation data of different kind. This can be considered as a first step for an unification of the national height systems in the continent.

### Introducción

La definición y el uso adecuado de los sistemas verticales se encuentra actualmente en un auge de interés no sólo en el ámbito internacional, sino también nacional. En la década pasada, la definición de sistemas de referencia en la parte de posiciones logró avances importantes,

## Una comparación de diferentes sistemas verticales en Venezuela

especialmente con relación al uso del GPS (Hoyer, et.al., 1998). En la actualidad, la Asociación Internacional de Geodesia IAG está liderando esfuerzos para llevar la dimensión vertical a estos niveles de resolución y exactitud. Por otra parte, las Oficinas Cartográficas de los países deben definir y suministrar una red vertical de alta calidad conectada a los diferentes métodos de observación actualmente en uso. (IAG, 2001)

En el ámbito geodésico existen varias alternativas para la definición y el uso de un sistema de referencia vertical, principalmente separadas por su relación con propiedades físicas o geométricas del cuerpo terrestre. Pueden definirse cotas geopotenciales, alturas dinámicas, alturas ortométricas y las de Helmert, alturas normales y, en el ámbito geométrico, las trigonométricas y las alturas elipsoidales (Torge, 2001). Las diferentes técnicas de medición relacionadas también mostraron cierta separación que hoy en día con la aplicación de procedimientos directamente tridimensionales requieren un cambio de pensamiento. En el campo profesional existe la necesidad de combinar data y métodos para obtener y cumplir con las altas demandas en exactitud y resolución espacial.

Atendiendo aspectos de esta problemática, en el recientemente concluido simposio internacional sobre sistemas de referencia verticales realizado en Cartagena, Colombia, se consideró la situación individual en los países, así como también se detallaron esfuerzos para la unificación a nivel continental (y global). Para Latinoamérica puede tomarse como referencia el trabajo proporcionado por el Grupo 3 del Proyecto SIRGAS denominado *Superficie de referencia vertical* (Cartagena, 2001).

En el presente trabajo se considera en una primera sección el sistema de las cotas y su conexión con el nivel medio del mar, para estudiar después las relaciones entre diferentes sistemas de alturas en dos trayectorias de nivelación representativas. En la última sección se investiga el efecto de los sistemas en puntos GPS sobre estaciones Benchmark (BM) de la red de nivelación de primer orden.

### **El sistema de cotas Nivel Medio del Mar (cota MSL) en Venezuela**

La situación venezolana con relación a alturas niveladas puede caracterizarse por dos aspectos:

- En la parte norte del país existe una red de nivelación de primer orden formada por varios circuitos, la cual se observó bajo criterios de alta precisión. Comúnmente se conoce el valor de esta altura como *cota* que puede interpretarse con ciertas restricciones como una altura ortométrica. La conexión al *nivel medio del mar* se realizó por

medio del mareógrafo ubicado en La Guaira. El Instituto Geográfico de Venezuela “Simón Bolívar” es el ente encargado de realizar y mantener esta red.

- En la parte sur de Venezuela, la situación es más complicada. Nunca vinculó a la red de nivelación precisa. La única manera de transferir alturas es por medio de técnicas de radar, mediciones GPS o utilizando un proceso inverso de gravimetría. Para una combinación de esta información con la de la parte norte se requiere el conocimiento del geoid.

Refiriéndonos a la parte norte, las nivelaciones se realizaron por trayectos o circuitos cerrados y se aplicaron parcialmente correcciones por medio de sus cierres. Una compensación total de la data nunca se realizó. Se trabajó con resultados de nivelaciones sin corregir por el efecto del campo gravitatorio. Aún cuando existen mediciones gravimétricas a lo largo o alrededor de las líneas de la red, nunca se realizaron los cálculos de corrección respectivos. Por lo tanto, las cotas no pueden llamarse alturas ortométricas de manera estricta. Utilizando otro criterio para establecer un sistema de alturas ortométricas que aplicara unas correcciones mínimas a la nivelación, podemos interpretar la cota bajo este concepto como una altura corregida por un valor *cero*. Este método se limita en su validez a una zona de cierta extensión, lo cual requiere la definición de varios sistemas diferentes en el país, una suposición prácticamente inaceptable para la referencia nacional uniforme.

De manera similar al proceso aplicado en muchos países, la fijación del datum vertical se realizó por medio de un sólo punto inicial. Esta conexión con el MSL se obtuvo por medio del mareógrafo principal del país ubicado en La Guaira. Durante un lapso de algunos años, a comienzo de la década de los 50, se promediaron los registros. La conexión del mareógrafo con la red vertical se obtuvo mediante nivelación de precisión entre la marca de referencia en el mareógrafo y un punto BM cercano. Con esta conexión, el valor de la cota en el BM se refiere al MSL con el datum La Guaira. A partir de esta conexión se puede transferir la cota a los demás puntos de los trayectos de nivelación del país. El valor adoptado con esta vinculación inicial nunca se cambió, aún cuando el BM original de conexión fue destruido.

En la gráfica se observa un leve aumento del registro durante los años 1950 hasta 1992 en el orden de +2 mm / año. A partir de esta fecha ocurre una tendencia contraria muy fuerte de - 6 mm / año (Drewes, et.al, 1999). Existe una conducta homogénea por casi 42 años que puede interpretarse como un aumento de aproximadamente 25 cm en el MSL, o una subida del mareógrafo en este mismo orden, pero con signo opuesto, o una combinación de los dos efectos. Los registros a partir de 1992 muestran una

## Una comparación de diferentes sistemas verticales en Venezuela

tendencia negativa fuerte, lo que no puede interpretarse como cambio del MSL o por razones de movimientos geotectónicos.

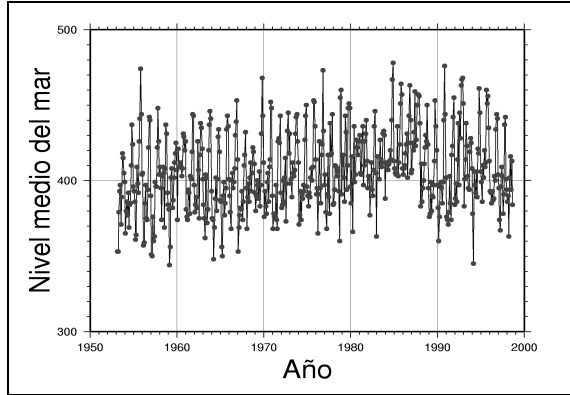


Fig.1: Conducta del mareógrafo La Guaira

Estudios relacionados en mareógrafos e incorporando una combinación de la data MSL con otros métodos como altimetría, GPS y geoide, se encuentran actualmente en proceso. Se busca mejoras en la definición del datum nacional y la unificación a nivel internacional (Cartagena, 2001).

### Diferentes sistemas de alturas en dos circuitos de nivelación

En el ámbito de este trabajo se recopiló la data de nivelación de dos trayectos específicos con la finalidad de evaluar los diferentes sistemas de alturas y sus transformaciones. Para solventar las características topográficas muy heterogéneas del país se utilizó un perfil en la planicie entre Maracaibo y La Fría, el cual se encuentra ubicado relativamente cerca del MSL con poca variación topográfica. Se incluyeron 58 puntos, por tener para ellos mediciones gravimétricas realizadas con gravímetros La Coste & Romberg de alta calidad.

Para el segundo perfil, se buscó la máxima variación topográfica en Venezuela. Se utilizó la línea de nivelación entre Agua Viva - Pico El Águila - Barinas, que cruza los Andes a lo largo de la carretera trasandina, siendo el Pico El Águila el paso más alto de vehículos en el país. En este trayecto existe información gravimétrica de varias fuentes, y en la parte geoidal pueden observarse gradientes muy fuertes de hasta 10 metros relacionados con las montañas. En la siguiente figura pueden observarse la distribución y ubicación de las 46 estaciones utilizadas.

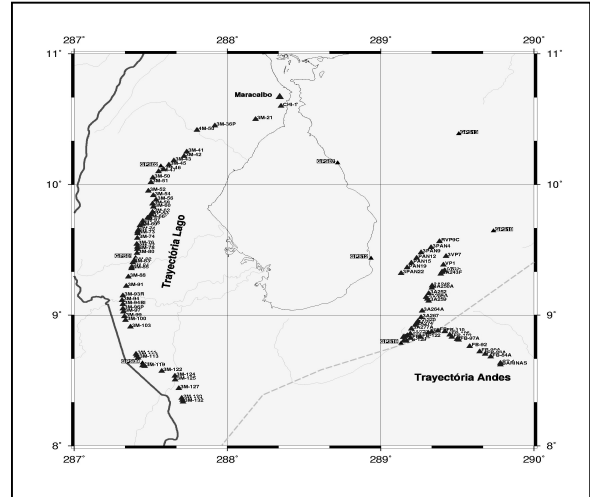


Fig.2: Trayectorias de nivelación Lago y Andes

Para perfilar la conducta de los diferentes sistemas se grafican los valores en función de la distancia a lo largo de los trayectos, separados para el caso de la trayectoria Lago y Andes, ver las Fig. 3 y 4. En la parte superior se puede revisar la variación de altura a lo largo del trayecto; en la parte inferior se traza las diferencias entre alturas normales (triángulos), alturas de Helmert (cruces) y alturas ortométricas (círculos) con relación a las cotas.

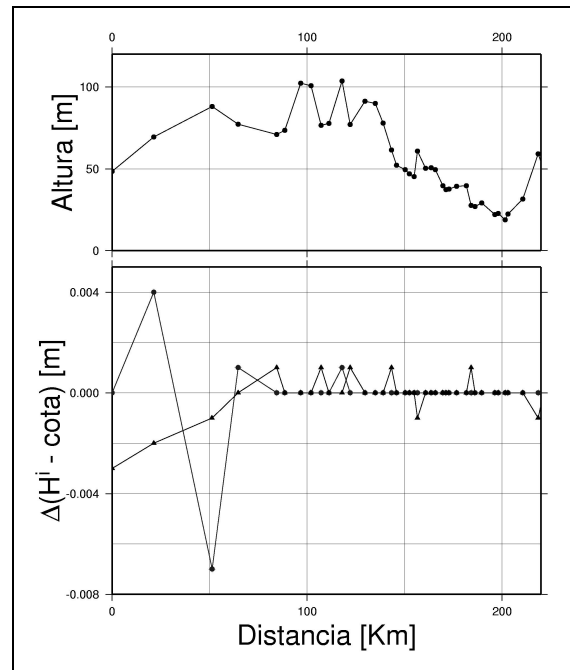


Fig. 3: Diferencia entre los sistemas de alturas (Lago)

## Una comparación de diferentes sistemas verticales en Venezuela

En el caso de la trayectoria, puede observarse una influencia mínima de las correcciones en los diferentes sistemas, por lo que puede utilizarse cualquier de ellos. Solamente ocurren diferencias milimétricas con los otros.

Se resume algunas características numéricas de los dos trayectorias en la Tab. 1. La simbología utilizada es C para la cota geopotencial,  $H^N$  para la altura normal,  $H^{HEL}$  para la altura según Helmert, H para la altura ortométrica y  $H^{DYN}$  para la altura dinámica.

Trayecto	Cota [m]	C [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$H^N$ [m]	$H^{HEL}$ [m]	H [m]	$H^{DYN}$ [m]
Lago	18.769-103.587	183.596-1013.235	18.769-103.583	18.770-103.586	18.770-103.585	18.722-103.325
Andes	53.320-4048.257	521.481-39578.352	53.312-4048.745	53.178-4036.015	53.320-4047.322	53.320-4049.198

Tab. 1: Variaciones de las diferentes alturas a lo largo de los trayectos

Pueden observarse valores muy parecidas en la parte de alturas normales, Helmert y ortométricas. Según la data, las alturas normales, en promedio, requieren un cambio de manera mínima con relación a las cotas. Las alturas Helmert y ortométricas muestran una variación 3 veces más alta, aún cuando todavía se encuentran en el orden milimétrico. Puede concluirse que en zonas planas las variaciones entre diferentes sistemas son muy pequeñas y prácticamente no afectan los resultados de la nivelación.

En el trayecto cruzando la parte montañosa las diferencias entre los distintos sistemas son mucho más grandes. Para alturas normales observamos diferencias con la cota entre -13 y +16 cm; las alturas ortométricas Helmert resultan con variaciones de -20 y 21 cm, las ortométricas estrictas en el intervalo entre -26 y 17 cm. Cambios de la hipótesis (alturas Helmert y ortométricas) donde se utilizaron los cálculos estrictos de corrección topográfica, arrojan variaciones en el orden de centímetros.

En la figura siguiente se muestra la conducta de las diferencias a lo largo del trayecto cruzando los Andes. Puede observarse en las correcciones requeridas entre diferentes sistemas una correlación fuerte con la misma altura. En la parte norte de la cadena, las correcciones son positivas, en la parte sur tenemos valores negativos. Similar al caso del trayecto Lago, la corrección aplicada a la nivelación es mínima en el caso de alturas normales. Los esfuerzos numéricos adicionales para el cálculo de alturas ortométricas (hipótesis para la gravedad media, uso de modelos digitales del terreno para las correcciones gravimétricas) no parecen justificados.

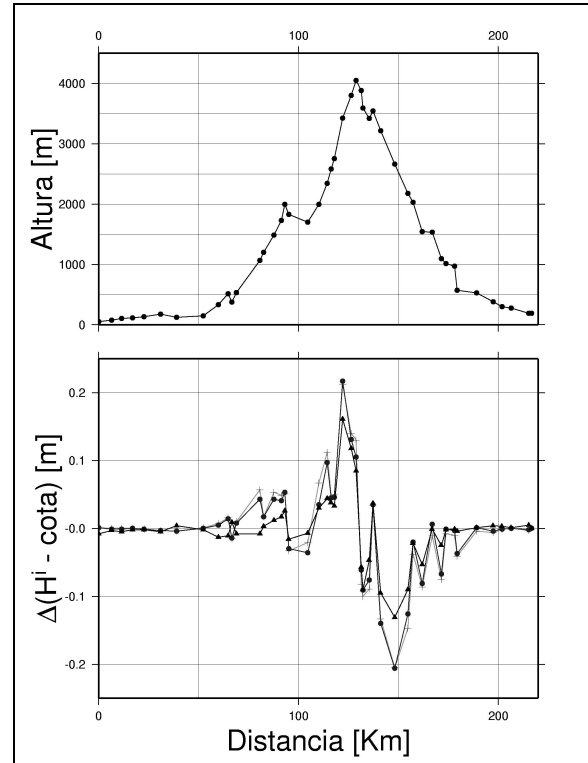


Fig. 4: Diferencia entre diferentes sistemas de alturas en el perfil Andes

### Diferentes sistemas de alturas en puntos GPS sobre estaciones de nivelación

Se parte de la altura elipsoidal proveniente de GPS, la que en combinación con la información geoidal puede transformarse a los diferentes tipos de alturas físicas. Debemos suponer un conocimiento adecuado de la conducta del geoide (modelo geopotencial, geoide gravimétrico, ondulación proveniente de observación directa GPS - BM).

Se aplica el procedimiento con la data de GPS sobre puntos BM en la zona comprendida entre 8° y 12° de latitud y 288° a 293° de longitud, respectivamente. La combinación de las mediciones satelitales sobre BM y las observaciones gravimétricas puede aplicarse directamente en un total de 83 estaciones con toda la información en forma observada, ver la Fig. 5.

Para determinar las variaciones entre los diferentes sistemas se comparan directamente las alturas respectivas. Para visualizar las diferencias se utilizan barras ubicadas en los puntos, que muestran la variación entre la altura normal y la cota. Pueden observarse ciertas tendencias regionales por efectos topográficos. La Tab. 2 resume algunas

## Una comparación de diferentes sistemas verticales en Venezuela

características de las diferentes alturas en el conjunto de puntos GPS utilizados. Puede observarse, que los sistemas de alturas normales, de Helmert y ortométricas coinciden muy bien entre ellas, pero existe una discrepancia grande con las cotas que debe considerarse en investigaciones futuras. La influencia del geoide sería uno de los puntos claves para estos trabajos futuros.

La Tab. 2 resume los valores mínimos y máximos de las alturas de los puntos de la zona utilizando diferentes sistemas. La zona contempla prácticamente el área con la máxima variación topográfica en Venezuela.

	Cota [m]	H <sup>N</sup> [m]	H <sup>DYN</sup> [m]	H <sup>Helm</sup> [m]	H [m]	h <sub>elips</sub> [m]
MIN	1.125	0.837	0.835	0.837	0.837	-16.811
MAX	4048.27	4048.52	4036.35	4049.08	4048.53	4049.71
Δ	-	-1.515 1.720	-11.921 1.528	-1.503 1.723	-1.504 1.722	-21.230 1.900

Tab. 2: Alturas en diferentes sistemas para los puntos GPS

Pueden observarse en la última línea de la Tabla diferencias entre alturas normales, y alturas ortométricas con respecto a las cotas MSL mucho más grandes en comparación con los resultados de la sección anterior. Investigando la distribución de estas diferencias se encuentran valores aislados que indican todavía estaciones con problemas en la data. Considerando la gran homogeneidad de la información GPS debe realizarse un análisis exhaustivo relacionado a la calidad y confiabilidad de la data nivelada.

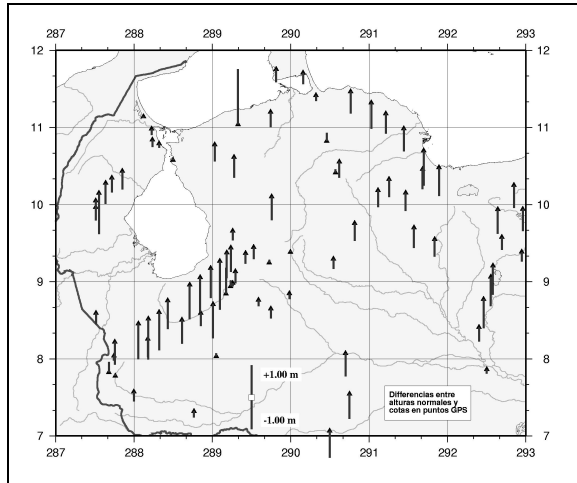


Fig. 5: Alturas normales y cotas en puntos GPS sobre nivelación

A parte de esto, todavía existe la problemática con el geoide utilizado. Aquí deben continuarse o extenderse las investigaciones respectivas para establecer esta superficie

con una resolución y calidad homogénea para cumplir las necesidades planteadas.

### Conclusiones

- El sistema de alturas reales, cotas MSL, produce problemas en su combinación con data de procedencia satelital.
- La data de la nivelación geométrica debe someterse a un ajuste conjunto de los circuitos. Deben considerarse efectos de movimientos por razones geotectónicas y climáticas.
- La nivelación geométrica, por su alta exactitud, no pierde su validez. Pero deberían realizarse las correcciones del campo gravitatorio terrestre para eliminar la dependencia con la trayectoria de nivelación.
- El uso combinado de data nivelada y GPS requiere un geoide de alta calidad.
- La altura ortométrica puede resolver el problema de una altura métrica con sentido físico, pero por las necesidades de hipótesis existen problemas de definición y de uniformidad sobre superficies extendidas. Su cálculo se dificulta por la necesidad de realizar correcciones topográficas y de densidad.
- La altura normal puede resolver el problema de una altura métrica con sentido físico. Su cálculo resulta directo sin necesidad de ninguna hipótesis. La altura normal se relaciona al elipsoide, por lo que se pueden determinar posiciones y alturas utilizando las mismas constantes fundamentales elipsoidales.
- Se requiere una preparación adecuada de la base de nivelación para la transformación respectiva.
- La unificación de datum verticales en el continente debe fundamentarse en un sistema nacional bien definido que es congruente con los de cada país.

### Agradecimiento

El estudio se co-financió por medio del Consejo de Desarrollo Humanístico y Técnico, CONDES, de la Universidad del Zulia.

Se agradece la disponibilidad de la data de nivelación por parte del Instituto Geográfico de Venezuela "Simón Bolívar".

## Una comparación de diferentes sistemas verticales en Venezuela

### Referencias

Cartagena, 2001: Abstract Book: IAG Symposium of Vertical Reference Systems: Cartagena, Colombia

Drewes, H., W. Bosch, W., Kaniuth, K., Hernandez, J., Hoyer, M., Wildermann, E., 1999: Realization of the Vertical Reference System in Venezuela; Abstract Book, IUGG General Meeting, IAG Symposia, Birmingham,

Hoyer, M., Arciniegas, S., Pereira, K., Fagard, H., Maturana, R., Torchetti, R., Drewes, H., Kumar, M., Seeber, G., 1998: The definition and realization of the reference system in the SIRGAS project: en Brunner, F.K. (Ed.): Advances in positioning and reference frames: IAG Symp. Proceed. 118: Springer, Berlin New York

IAG, 2001: Abstract Book: IAG Scientific Assembly, Budapest, Hungría

Torge, W., 2001, Geodesy, 3<sup>rd</sup> edition: Walter de Gruyter, Berlin New York.