

RESUMEN

El trabajo presenta un análisis completo de la infraestructura geodésica venezolana para el control vertical, esto incluye una revisión de antecedentes y del estado actual, evaluando las debilidades y fortalezas, de sus diferentes componentes, así como los proyectos futuros y alternativas de optimización de la red mareográfica, redes de nivelación, redes gravimétricas, superficie geoidal y el cálculo de números geopotenciales. El control geodésico vertical venezolano, en general presenta las mismas características de las de la mayoría de los países sudamericanos: apoyo local en mareógrafos representativos y redes de nivelación relativamente viejas y con poco mantenimiento, sin vinculación o corrección por mediciones gravimétricas; los cálculos geoidales son relativamente recientes y con las limitaciones que la geografía del país impone y la experiencia con respecto al cálculo de números geopotenciales es también limitada. Se plantean en la actualidad grandes esfuerzos para reactivar la red mareográfica, la cual tiene considerables vacíos en su continuidad por la falta de funcionamiento durante periodos importantes de varios mareógrafos, incluyendo el principal, el de La Guaira. Así mismo se ha planificado remedir las redes gravimétricas incluyendo nuevas mediciones absolutas y los cálculos correspondientes; sin embargo el rescate de las redes de nivelación, cuya evaluación se inició visitando parte de los circuitos existentes, representa un esfuerzo mucho mayor, para el cual no hay iniciativas a corto plazo y por lo tanto quizás deba buscarse una alternativa, tal como el uso eficiente de la nivelación GNSS o de tecnologías de sensoramiento remoto para casos específicos, cuando la calidad así lo permita. Distintos proyectos efectuados con anterioridad han permitido hacer estudios con respecto a la óptima combinación y/o verificación de las alturas con mediciones de gravedad en zonas montañosas y pie de montaña, de los cuales se han derivado importantes conclusiones para próximas actividades en este sentido. Con respecto a los cálculos geoidales, desde 2002 hasta el presente se han generado aproximadamente siete modelos nacionales incrementando cada vez más, naturalmente, la calidad de los mismos (actualmente RMS $\pm 12\text{cm}$.) sin embargo la escasa data disponible para la extensa zona selvática del sur del país impone limitaciones a la homogeneidad de esta calidad en todo el territorio nacional. Con esta revisión se pretende no solamente estudiar y diagnosticar debilidades sino hacer propuestas generales con respecto a los principales problemas.

CONTROL VERTICAL EN VENEZUELA

En Venezuela no existe un sistema de referencia tridimensional unificado, que abarque tanto la componente geométrica (coordenadas y altura) como la física (campo gravitatorio). El Datum Vertical es único y está establecido por la altura sobre el Nivel Medio del Mar referida a un mareógrafo que forma parte de la Red Mareográfica Nacional (RMN), el mareógrafo de La Guaira.

La conexión con el Nivel Medio del Mar (NMM) de dicha estación se obtuvo a comienzos de la década de los 50's, partiendo de observaciones continuas durante varios años y promediando los registros mareográficos. El enlace con la red vertical se obtuvo mediante nivelación de precisión entre la marca de referencia y un punto BM cercano; a partir de esta se transfirieron los valores de cota a los demás puntos de los trayectos de nivelación del país. A pesar de que el BM original de la conexión fue destruido, el valor adoptado con esta vinculación inicial nunca se cambió (Hernández, 1999).

Dicho procedimiento es muy común para la definición de referencias verticales en el mundo. La conexión a una época inicial significa, entre otras cosas, que no se consideran efectos como (Wildermann, 2001):

- Movimientos geodinámicos en el área del mareógrafo,
- Cambios del NMM con el tiempo

La definición del datum vertical en Venezuela, queda entonces afectado por tres inconvenientes directos:

- La no coincidencia entre el nivel medio del mar registrado en cualquier mareógrafo con la superficie de nivel del campo gravitatorio terrestre.
- Datum verticales materializados por mareógrafos diferentes tienen niveles diferentes y por lo tanto, las alturas asociadas a ellos no son compatibles entre sí y sus diferencias se propagan en las redes de nivelación generando deformaciones considerables en las cotas niveladas en los límites o fronteras (Drewes et. al. 1998).
- La no aplicabilidad de este sistema en las islas del territorio nacional, debido a que los circuitos de nivelación en tierra firme no se pueden conectar con los isleños.

Estos inconvenientes, aunados a otras dificultades de menor incidencia, llevan a la búsqueda e investigación de nuevas técnicas o métodos que permitan materializar un marco de referencia vertical moderno e internacional, que haga compatible los diferentes datums entre países y que a su vez sea independiente del tiempo.

RED MAREOGRÁFICA NACIONAL

La Red Mareográfica Nacional de Venezuela quedó establecida en 1948, considerándose iniciada con la puesta en operación de la estación mareográfica del Puerto de La Guaira. Esta fue tomada como estación matriz para la determinación de los planos de referencia como el NMM, el cual fue considerado el datum vertical a partir del cual el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), cubriría la geografía nacional con redes de nivelación, con el fin de determinar las alturas y depresiones de ésta.

La Guaira puede considerarse como una estación óptima en lo que concierne a la cantidad de tiempo de registros, a su ubicación, ya que posee buena accesibilidad por estar localizada en el centro de las costas del país, y a la poca influencia eólica en la zona.

Posteriormente, debido a la necesidad de conocer las variaciones de la marea a lo largo de las costas del territorio nacional y tener un control más confiable en la determinación del nivel medio del mar y otros planos de referencia vertical, fueron instaladas las estaciones mareográficas de Amuay (edo. Falcón) en 1950 y Puerto de Hierro (edo. Sucre) en 1955. Con la incorporación de la Red de Control vertical, el desarrollo de los poblados y la construcción de vías de comunicación, la determinación de alturas ortométricas cobra importancia y el número de estaciones aumenta incorporándose los mareógrafos de Cumaná (edo. Sucre), Carupano (edo. Sucre), Punta de Piedras (edo. Nueva Esparta) y finalmente Puerto Cabello (edo. Carabobo). La Red Mareográfica Nacional queda así establecida por siete (7) estaciones (IGVSB, 2003).

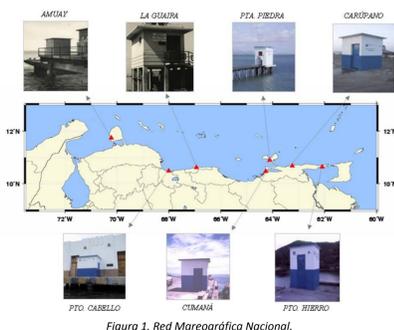


Figura 1. Red Mareográfica Nacional.

En la actualidad, ninguna de las estaciones mareográficas se encuentran activa a pesar de los esfuerzos realizados por personal del IGVSB. Esta situación esta motivada a: la falta de seguridad en las estaciones, deterioro de las casetas, dificultad de adquisición y reemplazo de equipos, entre otros. Sin embargo hay proyectos concretos del ente rector en el país para reactivar esta red con nuevos equipos.

Estación	Fecha			Período de Registro (hasta el 2006)	Estado actual	Ubicación geográfica
	Instalación	Eliminación	Reinstalación			
La Guaira	1948			58 años continuos	Inactivo	10° 37' N Lat 66° 56' W Long
Puerto Hierro	1955	1963	2001	8 años continuos Abandono por 37 años 4 años continuos	Inactivo	62° 05' 22" W Long
Puerto Cabello	1955	1968	2001	13 años continuos Abandono por 32 años 4 años continuos	Inactivo	10° 29' 01" N Lat 68° 00' 15" W Long
Cumaná	1948			S/I	Inactivo	10° 28' N Lat 64° 12' W Long
Carupano	1948	1962		A partir del año 1967	Inactivo	10° 40' 33" N Lat 63° 14' 42" W Long
Amuay	1950			56 años continuos	Inactivo	11° 45' N Lat 70° 13' W Long
Punta de Piedras	1970	1983	1984	22 años continuos	Inactivo	10° 54' 20" N Lat 64° 06' 30" W Long

Tabla 1. Información de las estaciones pertenecientes a la Red Mareográfica Nacional (adaptada de Bacaicoa y DeBourg, 2006)

RED GRAVIMÉTRICA NACIONAL

Las primeras mediciones gravimétricas precisas en todo el territorio nacional datan de finales de los años 70 en el marco de la Red estándar internacional de Gravedad (IGSN71), la Red de estandarización Gravimétrica de Latino América (LAGSN77), así como el establecimiento de la Red Gravimétrica nacional para el año 1975 (RGNV75). La RGNV75 se fundamenta en 59 estaciones distribuidas en todo el territorio nacional. En el año 1982 se llevó a cabo la elaboración de un nuevo diseño y medición, ya que la red mostraba ciertos problemas. Esta red se conoce como RGNV82 limitándose a solamente 29 estaciones (Wildermann, 1996).

Posteriormente en 1988 se establecieron seis (6) estaciones gravimétricas absolutas en Venezuela: Caracas, Ciudad Bolívar, Puerto Ayacucho, Mérida, Santa Elena de Uairen y Maracaibo. Durante esta campaña la red gravimétrica nacional RGNV82 fue reajustada incluyendo estas 6 estaciones absolutas (Drewes et. al., 1993)



Figura 2. Estaciones gravimétricas absolutas 1988.

Desde esa época distintas universidades e institutos oficiales del país, con la cooperación de institutos internacionales, han ejecutado campañas de medición para mejorar la cobertura de la red nacional, sin embargo, debido a la extensión del país y la presencia de zonas de difícil acceso, como la selva amazónica y los Andes de Mérida, la mejora general en la cobertura de los datos ha sido lenta.

En la actualidad, gracias a el trabajo conjunto entre el IGVSB y el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE), se prevé realizar para finales del presente año una nueva campaña de mediciones de gravedad absoluta en el territorio nacional. Durante esta campaña se pretende la medición de 10 estaciones, 6 de las cuales seguirán el diseño de la red de 1988, e instalarán 4 nuevas: Caracas (1 adicional), Maturín, Elorza, El Calvario.

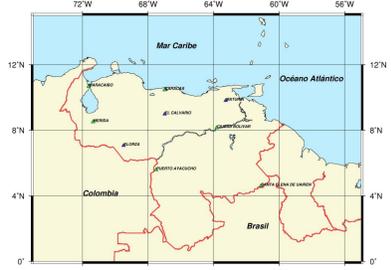


Figura 3. Diseño de la red de estaciones gravimétricas absolutas 2014 (estaciones de 1988 en color verde y las de 2014 en azul).

Durante su planificación se visitaron las antiguas bases gravimétricas constatando que muchas de ellas han sido destruidas o sus chapas reubicadas, lo que dificultará la conexión de antiguas mediciones con las nuevas.

RED DE NIVELACIÓN NACIONAL

La situación venezolana con relación a las alturas niveladas puede caracterizarse por dos aspectos (Wildermann, 2001):

- 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. La conexión al nivel medio del mar se realizó por medio del mareógrafo principal del país La Guaira.
- En la parte sur de Venezuela, la situación es más complicada, nunca se vinculó a la red de nivelación precisa.

Las nivelaciones en el norte del país se realizaron por trayectos o circuitos cerrados y se aplicaron parcialmente correcciones por medio de sus cierras. Una compensación total de los datos nunca se realizó y se trabajó con resultados de nivelaciones sin corregir el efecto del campo gravitatorio, aun cuando existían mediciones gravimétricas a lo largo de las líneas de la red.

Esta condición, junto con las grandes variaciones del relieve en la zona norte del país, causa discrepancias en los valores de alturas de puntos de control vertical ubicados en todo el territorio.

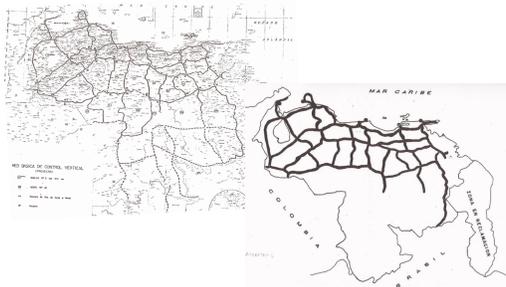


Figura 4. Diseño de la Red de Nivelación Nacional por circuitos.

El IGVSB emprendió hace algunos años un proyecto con la finalidad de revisar el estado de los BM de todos los circuitos de nivelación con miras a una evaluación del estado real de esta red.

UN NUEVO DATUM VERTICAL

El estado actual de la Red de Nivelación Nacional dificulta la ejecución de trabajos que permitan mejorar la definición de un sistema de alturas y establecimiento de un datum tridimensional. Mediante campañas de verificación del estado de la red de primer orden, se ha podido constatar que al menos el 60% de los vértices de la red de nivelación han sido destruidos o simplemente no existen, lo que dificulta la posibilidad de llevar a cabo trabajos de nivelación.

El sistema de alturas del país se caracteriza por:

- Estar referido al NMM del datum La Guaira; sin funcionamiento en la actualidad.
- No se realizó una compensación estricta de los circuitos, solo se distribuyeron errores de cierre en los trayectos individuales.
- No se realizaron correcciones gravimétricas.

Teniendo presente esta problemática y el estado en la que se encuentra la red de nivelación, a partir del año 2001 el Laboratorio de Geodesia Física y Satelital de la Universidad del Zulia, en conjunto al IGVSB, se propusieron realizar estudios que permitieran mejorar la definición del datum nacional y lograr la unificación a nivel internacional, incorporando: datos mareográficos, mediciones GPS, mediciones gravimétricas, altimetría satelital, un modelo geoidal de alta resolución y nivelación de primer orden. Para el año de 1998 ya el grupo III del proyecto SIRGAS planteaba la necesidad de establecer un sistema vertical moderno y continental.

Se hace necesario, entonces, establecer un sistema de referencia vertical moderno basado en una superficie de referencia global, tomando como punto de partida para su definición los registros mareográficos. Para iniciar este proceso es necesario partir de (Bacaicoa y DeBourg, 2006):

- Materializar el sistema mediante el establecimiento de un conjunto de estaciones que constituyan el punto de partida para la propagación del control vertical, incluyendo los mareógrafos, logrando de esta forma su vinculación al nuevo y manteniendo la vigencia de aquellas alturas definidas por el método clásico.
- La combinación precisa de cantidades geodésicas verticales (h) con las físicas (N, H^N, H, C), camino para permitir la compatibilidad entre alturas físicas pues todas estarían asociadas a la misma superficie de referencia, optimizando el intercambio de información geoespacial.

Básicamente, las estaciones que conformen la red vertical básica deberían ser niveladas geométricamente, corregidas por gravedad y estar definidas geodésicamente con posicionamiento GNSS.

CÁLCULOS GEOIDALES EN VENEZUELA

Los cálculos geoidales en Venezuela son relativamente recientes y con las limitaciones que la geografía del país impone y la experiencia con respecto al cálculo de números geopotenciales. Desde el año 2002 hasta el presente se han generado aproximadamente siete modelos nacionales incrementando cada vez más, naturalmente, la calidad de los mismos (actualmente RMS $\pm 14\text{cm}$). Sin embargo la escasa data disponible para la extensa zona selvática del sur del país impone limitaciones a la homogeneidad de esta calidad en todo el territorio nacional.

La determinación de un modelo geoidal en cualquier país, es un proyecto que requiere recursos y esfuerzos mancomunados de instituciones e individuos. A continuación se presenta un cuadro que resume las principales características de los modelos generados (Hoyer et. al., 2011, Acuna G., 2013).

Modelo geoidal	Autor(es)	Metodología	RMS (comparación GPS/Niv)
GEODIVEN	(Hoyer et. al., 2002)	LSC	$\pm 50\text{cm}$
VGM03	(Acuña y Bosch, 2003)	FFT y LSC	$\pm 10\text{cm}$
MGCV04 (adoptado por el IGVSB)	(Hoyer et. al., 2004)	LSC, técnica Remove-Restore	$\pm 20\text{cm}$ $\pm 1,4\text{cm}$ en algunas estaciones
MGCV05	(Codallo y Leon, 2008)	LSC, técnica Remove-Restore	$\pm 18\text{cm}$
MGCV06	(Codallo y Leon, 2008)	LSC, técnica Remove-Restore	$\pm 10\text{cm}$ $\pm 57\text{cm}$ en algunas estaciones
VGM10	(Acuña et. al., 2011)	LSC	$\pm 15\text{cm}$
VGM12	(Acuña G., 2013)	LSC	$\pm 14\text{cm}$

Tabla 2. Características principales de los modelos geoidales venezolanos.

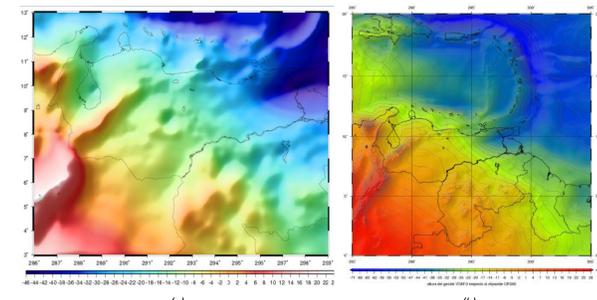


Figura 5. MGCV04, adaptado por el IGVSB como modelo oficial (a) y VGM12, último modelo generado de alta resolución (b).

ALTURAS EN DIFERENTES SISTEMAS VERTICALES

En el ámbito de alturas existe una cierta inconsistencia considerando los altos niveles de precisión que hoy en día permiten los métodos observacionales y de cálculo. La diferencia de más importancia es la separación entre alturas geométricas y alturas físicas.

Con respecto a los diferentes sistemas de alturas y su aplicación se presenta un ejercicio práctico de comparación de alturas partiendo del conocimiento de data nivelada, mediciones GNSS y valores de gravedad. Se calcularon correcciones a aplicar a las alturas elipsoidales ($H_{\text{cotm-dniv}}$), alturas normales (H^N) y cotas geopotenciales.

Las estaciones utilizadas se encuentran a una distancia espacial de 22,9 km y alta variación topográfica, ambos puntos pertenecientes a la red REGVEN. LG-SIRGAS corresponde a un punto ubicado en el puerto de La Guaira (costa venezolana) y el Junquito esta ubicado en zona montañosa.

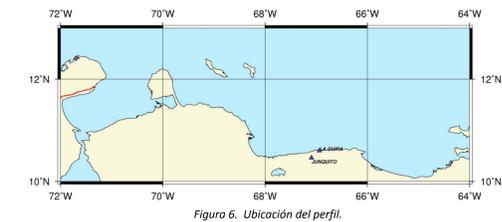


Figura 6. Ubicación del perfil.

Estación	h (m)	dniv (m)	COTA (m)	H _{cotm-dniv} (m)	Cota geopotencial (gpu)	H ^N (m)
LG-SIRGAS	-16,22	0	2,484	2,484	24,29941	2,48408
Junquito	2016,965	2033,185	2033,33	2033,240	19883,55622	2033,30212

Tabla 3. Variaciones de los diferentes alturas a lo largo del trayecto.

Para determinar las variaciones se comparan directamente las alturas respectivas. Como es de esperar en el punto cercano a la costa y en zona plana presenta variaciones muy pequeñas entre los diferentes sistemas y prácticamente no afecta la nivelación. En la parte montañosa el efecto es mayor observándose variaciones de varios centímetros entre las diferentes alturas, evidenciándose el efecto de las masas topográficas en la gravedad.

En base a las consideraciones para un sistema nacional óptimo de alturas, se recomienda el uso de alturas normales ya que cumplen con la mayor parte ellas. La definición de sus superficie de referencia es mas sencilla ya que no se necesitan modelos geofísicos.

COMENTARIOS FINALES

Las condiciones actuales de la Red Mareográfica Nacional así como de la Red de Nivelación Nacional dificultan la ejecución de transformación entre sistemas de alturas y unificación de datums verticales en el continente. Por estas razones el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar tiene como tarea prioritaria dar solución a esta problemática a pesar de los esfuerzos que esto represente.

Los datos procedentes de diferentes fuentes y naturaleza nos lleva a la necesidad de unificar, controlar y combinar diferentes contribuciones. Se requiere una preparación adecuada de la base de nivelación para la transformación respectiva.

El uso combinado de data nivelada y GNSS requiere un geode de alta calidad. En los últimos años se han calculado siete modelos geoidales incrementando cada vez mas la calidad de los mismos sin embargo debido a la extensión del territorio nacional, la existencia de zonas de difícil acceso y variaciones relevantes en la topografía, se plantea la necesidad de incluir datos gravimétricos provenientes de tecnología aerotransportada que permita mejorar la cobertura de información para el cálculo de modelos con mejor precisión.

Para mejorar la información y cobertura en el sur del país se plantea como procedimientos viables el uso de datos de radar, mediciones GPS o utilizando un proceso inverso de gravimetría.

Venezuela tiene previsto incorporar todas las recomendaciones del grupo SIRGAS para actualizar y mejorar su sistema de control vertical.

En base a las consideraciones para un sistema nacional óptimo de alturas, se recomienda el uso de alturas normales ya que cumplen con la mayor parte ellas. La definición de sus superficie de referencia es mas sencilla ya que no se necesitan modelos geofísicos.

REFERENCIAS

• Acuña G. (2013). VGM12: Nueva versión del Modelo Geoidal Venezolano. Maracaibo, Venezuela. Disponible en: www.Lgfs.luz.edu.ve.

• Bacaicoa L. y DeBoutg S. (2006). Vinculación entre el Sistema Mareográfico nacional, la Línea de Nivelación entre Mareógrafos (NEM) y la Red GPS COSTAVEN. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geodesta. Escuela de Ingeniería Geodésica. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

• Drewes H., Torge W., Röder R., Badell C., Bravo D., Chourio O. (1993). Geodynamic research by absolute and relative gravimetry in Venezuela. En Torge W, González-Fletcher A., Tanner JD (eds.). Recent Geodetic and Gravimetric Research in Latin America. IAG Simposio No.111. Viena, Austria.

• Drewes H., Sánchez L., Blitzkow D., y Freitas S. (1998). Documento técnico sobre sistemas de referencia vertical para América del Sur. Boletín informativo No.6 del proyecto SIRGAS.

• Hernandez J., (1999). Comunicaciones personales.

• Hoyer M., Wildermann E., Codallo H., Acuña G., Brito J., Cloce V., Royero G., Barrios M., Hernandez J. (2011). Modelos geoidales y sus aplicaciones. Ier Congreso Internacional de Geodesia, Topografía y Catastro. 1era Asamblea General de la APPA. Ciudad de Panamá, Panamá.

• IGVSB (2003). Red Mareográfica Venezolana. Reporte Rafael melean. Caracas, Venezuela.

• Wildermann E. (1996). Procesamientos de cálculos geoidales en áreas montañosas. Trabajo de ascenso. Escuela de Ingeniería Geodésica. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia.

• Wildermann E. (2001). Análisis y comparación de sistemas verticales en Venezuela. Trabajo de Ascenso para optar a la categoría de Profesor Titular. Escuela de Ingeniería Geodésica. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.