

# Evaluación del Datum Altimétrico Venezolano

**Melvin Hoyer y Freddy Guerrero\***

*Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia.*

*Instituto Universitario Tecnológico de Maracaibo\**

## Resumen

El presente artículo expone la investigación efectuada para analizar los problemas inherentes a la definición y determinación del datum altimétrico venezolano. En el pasado se instalaron varias estaciones mareográficas con ese propósito, sin embargo, se presentan discrepancias debido a los fenómenos locales cerca de estas estaciones, tales como la topografía del mar, mareas, corrientes oceánicas y la salinidad, entre otros, los cuales se traducen en distorsiones en las líneas de nivelación apoyadas en ellas. Luego de evaluar esta problemática, el trabajo presenta una metodología y algunas proposiciones para redefinir el datum altimétrico venezolano, por ejemplo, un ajuste combinado que utilice los datos de nivelación, GPS y anomalías gravimétricas.

**Palabras claves :** datum altimétrico, redefinición, Venezuela.

## Evaluating the Venezuelan Altimetric Datum

### Abstract

This article studies the different types of problems involved in determining and defining the Venezuelan Altimetric Datum. Although several mareographic stations were set up as far back as 1948, discrepancies in time and measurements were caused by local phenomena occurring near the stations: sea surface topography, tides, ocean currents and salinity, to name but a few. These phenomena create distortions in the National Levelling Network. A methodological model was designed as a possible guide for researchers wishing to redefine the Venezuelan Altimetric Network. Herein are reviewed several classic and modern techniques for obtaining more reliable data, thus leading to an enhancement of the above-mentioned Datum. These are presented in the Combined Geodetic Adjustment, which uses gravimetric anomalies, GPS and levelling data.

**Key words :** vertical datum, redefinition, Venezuela.

### Introducción

Independientemente de los modernos tratamientos para el estudio y definición del datum geodésico (por ejemplo Hoyer, [6] 1986), en nuestros países sigue siendo de interés la evaluación de los procedimientos utilizados para la determinación de la superficie de referencia para las

alturas, así como el diagnóstico de la correspondiente situación actual.

El término Nivel Medio del Mar (NMM) se aplica solamente al datum obtenido mediante observaciones realizadas en costas de mar abierto o en aguas adyacentes que tengan libre comunicación con el mar y se le define como el promedio de las alturas del mar para todas las fases de

marea de un ciclo lunar completo de 18.6 años de observaciones continuas.

Con respecto a esta materia, no existe en Venezuela, un conocimiento detallado de la metodología, procedimiento y consecuencias de la definición del origen del sistema ortométrico de alturas materializado en el mareógrafo de La Guaira, este sistema está conformado por una red de mantenimiento y control poco confiable.

El objetivo fundamental de este trabajo, es presentar la realidad del datum vertical venezolano, guiar a una mejor determinación del plano de referencia para las alturas, revisando teóricamente alternativas para su redefinición.

A partir del año 1948, cuando se iniciaron los trabajos de nivelación geodésica en el país con el auxilio del U. S. Coast and Geodetic Survey, se comienza también la determinación del nivel medio del mar. La Dirección de Cartografía Nacional es el organismo oficial encargado de controlar los

registros y calcular los niveles medios del mar en las estaciones mareográficas (EM) ubicadas en las costas; sin embargo, la falta de recursos, impide generalmente, que se les preste el mantenimiento adecuado.

Actualmente la red mareográfica nacional está constituida por cuatro estaciones primarias: La Guaira (EM1), Carúpano (EM2), Amuay (EM3) y Maracaibo (EM4). Haciéndose esfuerzos por estabilizar su extensión a las localidades de Cumaná (EM5) y Punta de Piedra (EM6). Así mismo existen proyectos para nuevas estaciones: Delta del Orinoco (EM7), Güiría (EM8), Isla de Aves (EM9), San Juan de los Cayos (EM10) y Castilletes (EM11), tal como se indica en la Figura N° 1. El mareógrafo principal de la red nacional está localizado en el puerto de la Guaira, instalado en 1948 y con registros continuos, desde entonces, la Figura N° 2 presenta la variación del nivel registrado en el periodo 1949 - 1988, donde

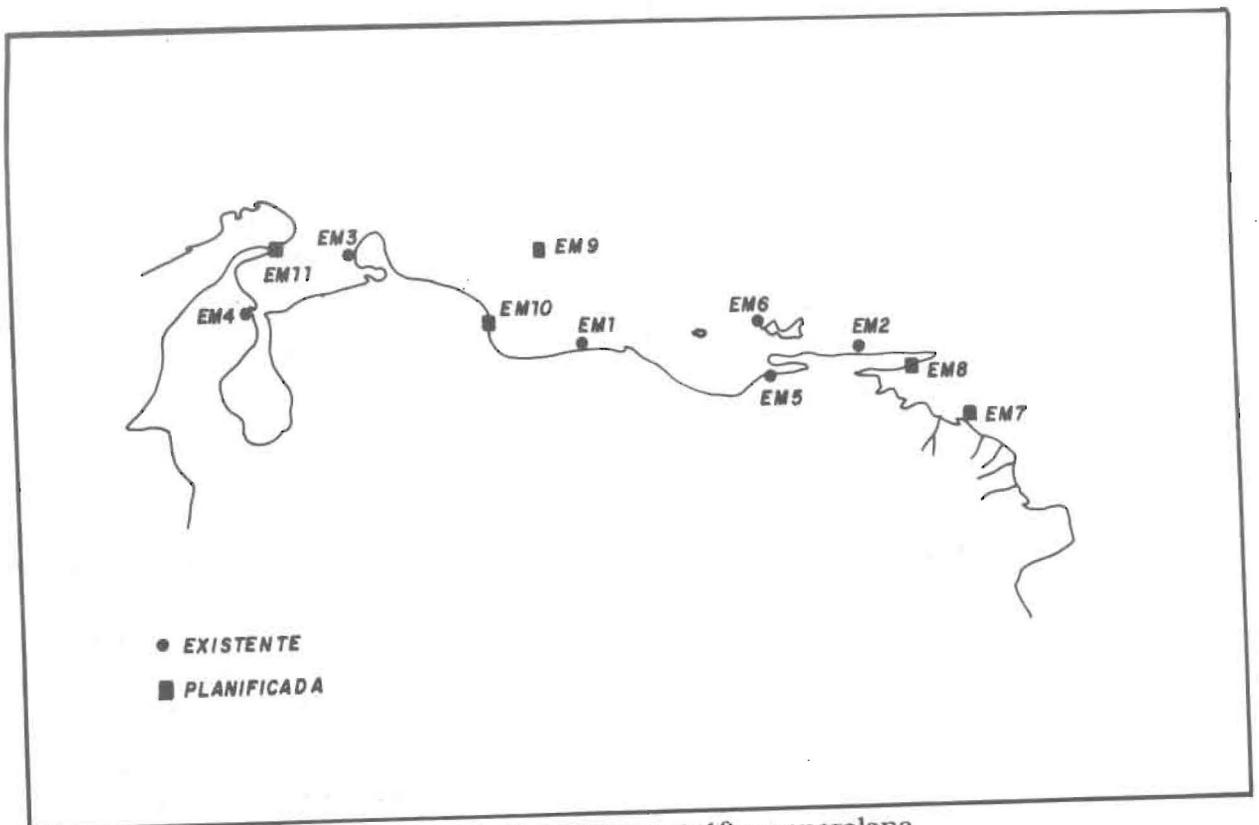


Figura No 1. Red mareográfica venezolana

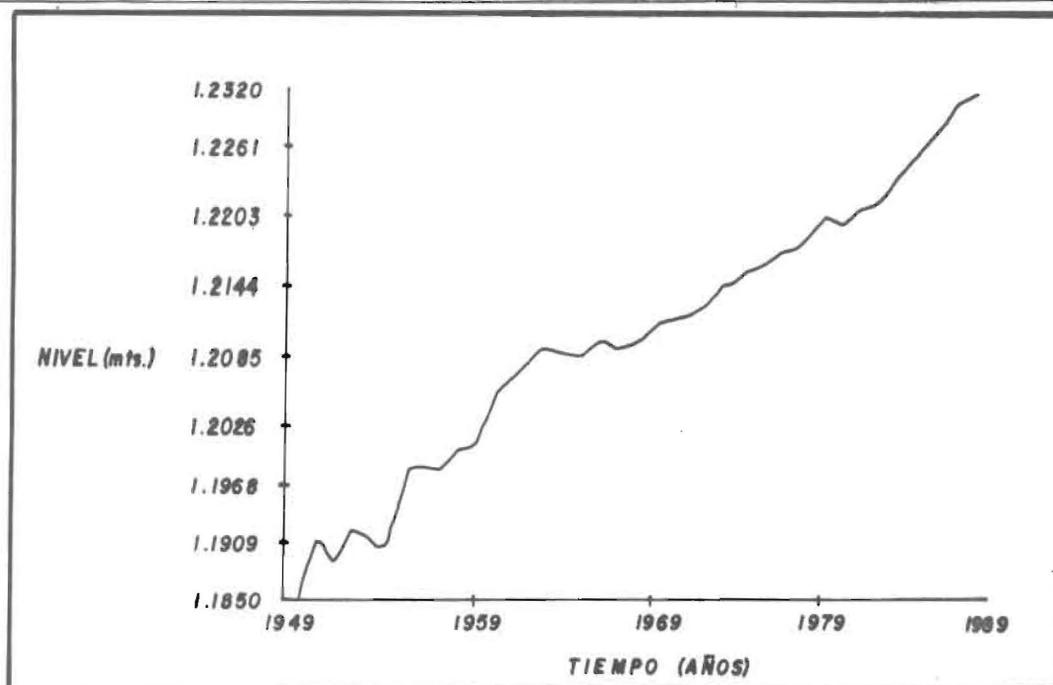


Figura No 2. Variación del nivel medio del mar en La Guaira

puede observarse un incremento positivo en el orden de mms por año, producto del proceso de recalentamiento que sufre todo el globo terrestre.

### Generalidades

El NMM por definición es :

$$S = \frac{1}{T} \int_0^t S(t) dt \text{ cuando } T \rightarrow \infty \quad (1)$$

donde T es el periodo de medición y de integración y S (t) es una función que depende de varios factores (Molines [7], 1985)

Aun cuando no se disponga de un periodo infinito de registros, se debe poseer información

mareográfica continua en cada estación, la cual resultará en diferentes periodos de observación, en algunos casos muchos años y en otros, pocos o sólo meses. El datum nacional debe determinarse realizando un ajuste de un grupo de estaciones mareográficas ubicadas en las costas, en caso contrario se trata de datums locales.

En Venezuela se presentan pequeñas discrepancias entre los datums locales de un lugar con respecto a otro. La situación se ilustra en la figura N° 3, en la cual se muestran diferentes superficies cerca del geode, se conoce un NMM libre de oscilaciones de periodo corto, utilizando los mareógrafos se ha fijado el cero por

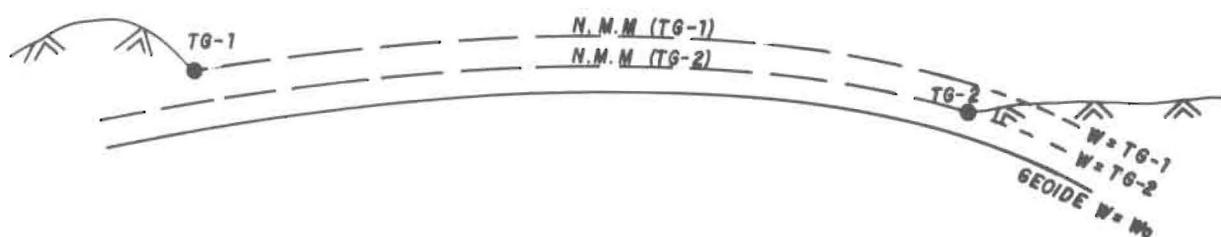


Figura N° 3. Nivel medio del mar para dos estaciones mareográficas diferentes.

ejemplo en la estación TG1 y en la estación TG2. Las alturas ortométricas se refieren después a las superficies equipotenciales  $W = TG1$  y  $W = TG2$  respectivamente. El geoide  $W = W_0$  no coincide con las superficies equipotenciales ni tampoco con el NMM.

En Venezuela la red mareográfica no cubre significativamente las costas, ni tampoco las zonas extracontinentales, como las islas. La problemática de cobertura y de mantenimiento, la convierten en una red inconsistente y de configuración débil.

En la red mareográfica se apoya la red de nivelación. En nuestro país, al igual que en casi todo el mundo las nivelaciones se ejecutan a lo largo de las carreteras, desconociéndose la posición horizontal de los puntos altimétricos, en virtud de la independencia de los procedimientos de triangulación y de nivelación.

Cada estación mareográfica primaria origina un datum local para un circuito de nivelación, transmitiendo su error particular a ese circuito y originando una diversidad de datums verticales.

Las redes verticales no cumplen con una configuración geométrica consistente, debido a que los circuitos son dos o tres veces mayor de lo recomendado por las normas, la razón principal de este problema es la relativamente escasa vialidad del país en comparación con lo extenso de su territorio (Almeida [1], 1989).

Las mediciones de altura de los B.M. no han sido ajustadas, en forma confiable, con las mediciones gravimétricas. Los errores sistemáticos que no se detectan en la medición de la nivelación geométrica, presentan una influencia significativa y son los fenómenos que más influyen en las redes verticales. Por otro lado, la carencia de un programa de mantenimiento continuo ha traído como consecuencia el descuido y abandono de las estructuras geodésicas, especialmente de la red vertical.

En conclusión, la red vertical nacional no cumple con las condiciones de confiabilidad esperada en la actualidad. Todas estas consideraciones plasman la deficiencia de un datum alti-

métrico y la inseguridad de la red vertical en el país, por lo cual se propone la redefinición del datum vertical venezolano y la óptima vinculación con la red de alturas.

### Metodología para definir un datum vertical

Fundamentándose en criterios y técnicas nuevas, tanto en las mediciones como en el procesamiento de la información, es decir considerando los conceptos de preanálisis, postanálisis, el nuevo tratamiento del datum geodésico y las nuevas técnicas de medición y procesamiento, se propone la siguiente metodología para la redefinición del datum vertical:

- 1 Revisión de la información altimétrica disponible
- 2 Revisión de los métodos y técnicas que permiten definir un datum altimétrico
- 3 Formulación de alternativas posibles
- 4 Análisis y toma de decisiones
- 5 Ejecución de las actividades
- 6 Postanálisis

La información altimétrica disponible está en manos de organismos del estado y de algunas empresas privadas que han ejecutado trabajos geodésicos en el país, tales como la Dirección de Cartografía Nacional, el Ministerio de Energía y Minas, la industria petrolera, etc.

Esta información corresponde a los siguientes tipos de mediciones: alturas horarias, mediciones gravimétricas, mediciones satelitales (Doppler, GPS), mediciones astrogeodésicas, inerciales, etc.

Cada una de estas técnicas puede conducir a la definición de un datum altimétrico. Los registros de mareas determinan el NMM en las costas, la altimetría satelitar nos define un NMM en los océanos y en los mares, con la ventaja de quedar vinculado al nivel continental o mundial; con las observaciones de gravedad obtenemos las anomalías gravimétricas y determinamos la ondulación del geoide referida al campo gravitatorio terrestre; con las mediciones

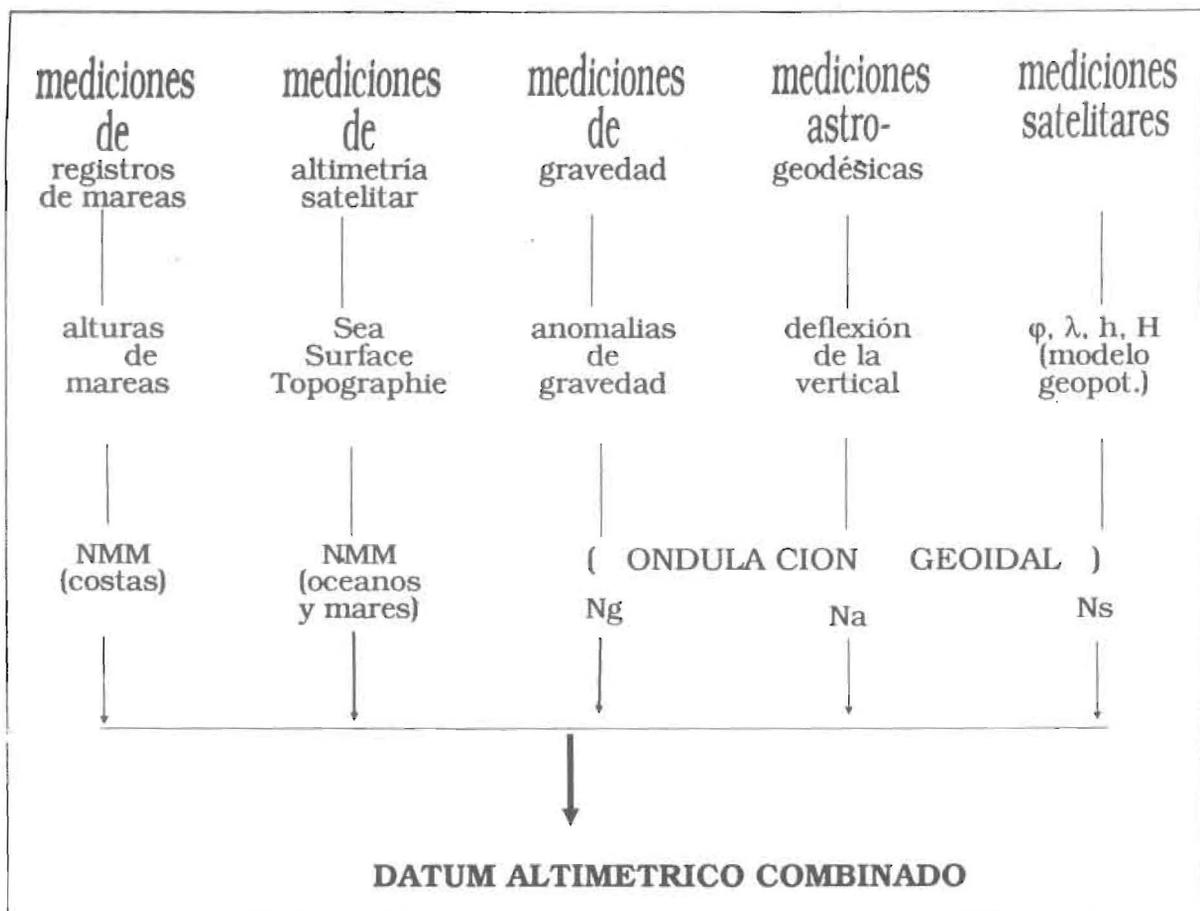
satelitares (GPS o Doppler) se obtiene una altura elipsoidal confiable en el orden del cm al dm en forma relativa y del dm al m en forma absoluta y pudiéndose derivar, además un modelo global para las alturas geoidales.

En el siguiente esquema, se presentan las mediciones y técnicas que pueden conducir a la definición de un datum altimétrico:

Al combinar todas estas mediciones en un procesamiento conjunto se obtiene un datum altimétrico integrado. La importancia de las mediciones clásicas está disminuyendo continuamente como consecuencia del incremento de la

En la siguiente sección se presenta el fundamento teórico de algunas alternativas posibles para la redefinición del datum altimétrico, un estudio de preanálisis debe conducir a la selección del método mas adecuado de acuerdo a los objetivos fundamentales y a los recursos disponibles.

Posteriormente deben ejecutarse las actividades previstas para materializar la redefinición, por ejemplo, restablecimiento de la red mareográfica ideal, vinculación de las estaciones mareográficas mediante la nivelación, planificación y ejecución de mediciones gravimétricas y/o sa-



exactitud y de la disminución de costos de las técnicas espaciales, las cuales permiten determinar coordenadas relativas y absolutas en el sistema geocéntrico. Estos nuevos conceptos hacen que los clásicos se vuelvan obsoletos, aun cuando la nivelación pueda ser utilizada para vincular puntos determinados por la técnica espacial.

telitares, procesamiento y análisis.

Finalmente se postanalizará la calidad y bondad del procedimiento cumplido, previéndose los correctivos y mejoras necesarias, a partir de los resultados de la aplicación de criterios seleccionados.

## Alternativas para la redefinición del datum altimétrico venezolano

### Alternativa No 1

Definir un datum altimétrico mediante las observaciones de mareas y vincular por medio de la nivelación, la red de nivelación primaria y la red mareográfica, efectuando posteriormente un ajuste simultáneo.

Los datos verticales deben ser determinados cuidadosamente, siendo el NMM el datum vertical obtenido en el pasado por observaciones de mareas al registrar la superficie del nivel medio del mar en ese lugar por varios años de observación.

Las observaciones de la nivelación geodésica usan estas estaciones de mareas como puntos fijos. Sin embargo, debido a los fenómenos locales (topografía de la superficie del mar, mareas, corrientes oceánicas, etc.) el nivel medio del mar determinado aún así, difiere significativamente de una superficie equipotencial de referencia cero (geoide). Consecuentemente, si conectamos líneas de nivelación, a diferentes estaciones de mareas, se presentarán pequeñas discrepancias, las cuales producirán distorsiones en la red de nivelación.

Se propone hacer un ajuste simultáneo de las estaciones mareográficas y de las observaciones de nivelación, para obtener un plano de referencia total vinculado a lo largo de las costas. Este datum altimétrico del nivel medio del mar minimiza al máximo los residuales en las estaciones.

El problema sería que no existe ninguna garantía de que ese datum altimétrico sea una superficie equipotencial o el geoide, sin embargo se garantizaría la uniformidad para las alturas derivadas de diferentes líneas de nivelación en todo el país.

### Alternativa No 2

Considerando que las anomalías gravimétricas ( $\Delta g$ ) y las alturas geoidales (N) representan la desviación de la tierra real con respecto a un modelo asumido, el valor medido de la intensidad de gravedad menos el valor teórico calculado, en

el mismo punto, da una referencia acerca de N a partir de  $\Delta g$ . Esto puede conducir a la definición de un datum vertical a partir de mediciones gravimétricas utilizando el teorema de Stokes, para obtener N, en un punto específico P, en el cual se realizan las mediciones de  $\Delta g$  (por ejemplo Bonford [2], 1980).

Un datum vertical se puede obtener por mediciones gravimétricas considerando las anomalías de aire libre  $\Delta g_0$  mediante la expresión:

$$\Delta g_0 = g + \frac{\partial \gamma}{\partial h} H_0 - \gamma \quad (2)$$

donde  $g$  es la gravedad observada,  $H_0$  la altura ortométrica,  $h$  la altura elipsoidal y  $\gamma$  representa la gravedad normal.

Se pueden calcular las anomalías de gravedad por medio de los coeficientes armónicos esféricos  $\bar{C}_{nm}$  y  $\bar{S}_{nm}$  del campo de gravedad terrestre, se tiene entonces:

$$\Delta g = \gamma \sum_{n=2}^{\infty} (n-1) \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \quad (3)$$

El valor  $\Delta g$  calculado puede llegar a ser cero. La diferencia se debe a que el sistema de altura usado en (1) no está referido al datum vertical (geoide) y puede haber un error en la definición del elipsoide, por ejemplo una selección inadecuada del elipsoide de referencia. Entonces, se forma un modelo matemático:

$$F(\Delta g_0 - \Delta g) = 0 \quad (4)$$

Linearizando queda:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial H} dH_i - d\gamma + \Delta g - \Delta g_0 = v \quad (5)$$

donde  $v$  representa los errores residuales y  $d\gamma$  la corrección constante a la gravedad.

### Alternativa No 3

Utilizando una combinación de mediciones clásicas terrestres (mareográficas, gravedad, etc.) y vinculándolas con la nivelación de precisión, se puede definir también un datum altimétrico.

Se trata de combinar las observaciones de diferencias de potencial, producto de la nivelación geométrica con observaciones de gravedad alrededor de cada estación mareográfica, como se simboliza en la figura No 4.

#### Alternativa N° 4

La disponibilidad de datos precisos de altimetría satelitar (Seasat, Geosat, ERS-1) representa un tipo de información que puede contribuir significativamente a la solución de la definición del datum vertical de un país (Colombo [3], 1980), (Fubara [4], 1974).

corrigiendo por efectos de mareas, salinidad, corrientes, etc.

$a(t)$  es la distancia satélite - elipsoide, la cual puede obtenerse a partir del cálculo de efemérides,  $d(t)$  es la separación entre el nivel medio del mar y el geode y  $N$  la altura geoidal, tal como se aprecia en la Figura N° 5.

El error medio cuadrático de un perfil transversal puede ser, dependiendo del satélite, de  $\pm 0.5$  m y aún mejor.

Al considerar las variaciones temporales de tipo meteorológico y oceanográfico y las variacio-

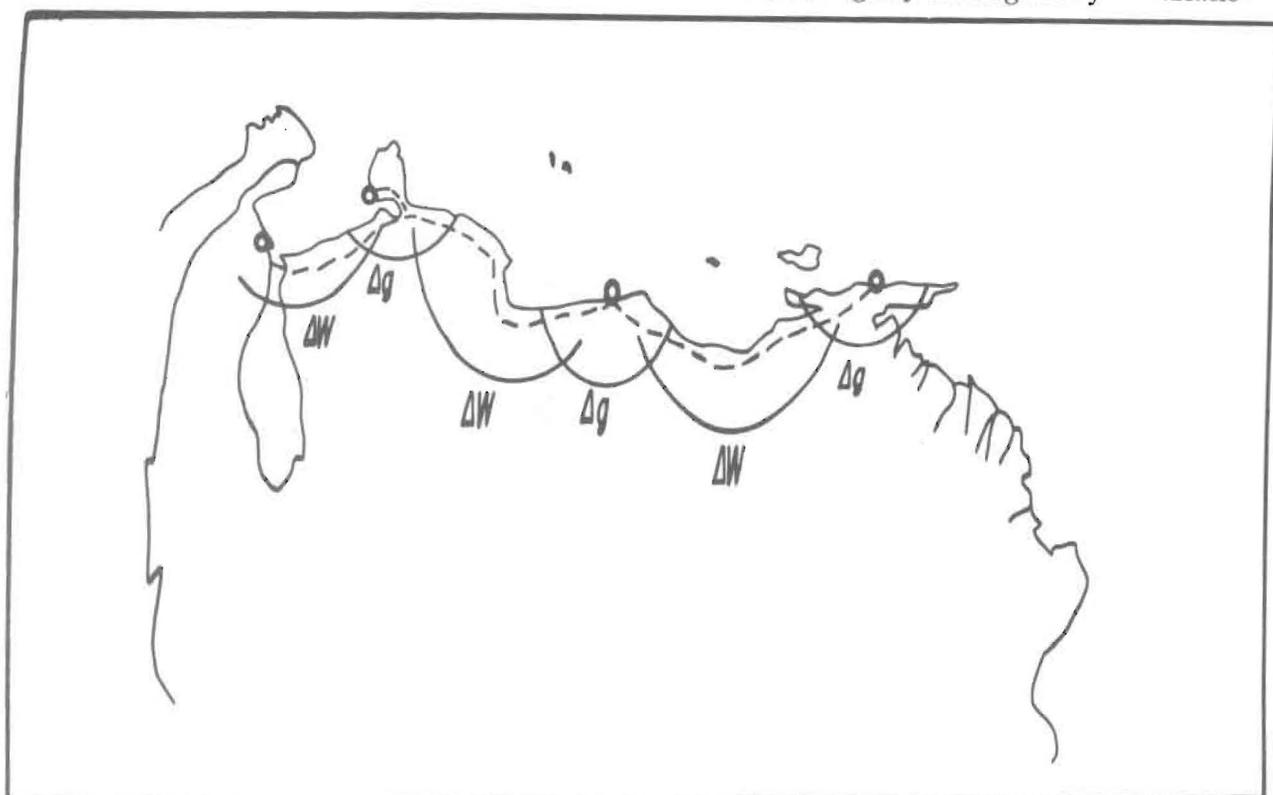


Figura N° 4. Combinación de diferencias de potencial, nivelación con diferencias de gravedad, alrededor de estaciones mareográficas.

Esta alternativa nos permitiría determinar y definir el nivel medio del mar cerca de costas venezolanas, ya que el método altimétrico no registra información en zona continental.

Se escogería la zona de interés en las costas venezolanas considerando que el instrumento de medición que lleva el satélite es un altímetro de radar y que no se requiere instrumento en tierra (por ejemplo Seeber [8], 1988).

La ecuación de observación es:

$$A(t) = a(t) - d(t) - N \quad (6)$$

$A(t)$  es el valor medido por el altímetro desde el satélite hasta la superficie del mar, el cual se reduce de la superficie instantánea a la media,

nes en el movimiento del agua, se obtiene la superficie cuasiestacionaria del mar a partir de la medición del altímetro, posteriormente se deriva la ondulación del geode en conjunto con la topografía de la superficie marina.

#### Alternativa No 5

La geodesia satelitar cuenta con el recurso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) el cual garantiza una alta exactitud en la determinación indirecta de la altura ortométrica  $H$ , según la conocida expresión  $H = h - N$  (por ejemplo Torge [9], 1980) al medirse satelitalmente la altura elipsoidal  $h$ , siempre y cuando se conozca la ondulación del geode  $N$ . Por otro lado, si ambas alturas se conocen, se puede calcular  $N$ .

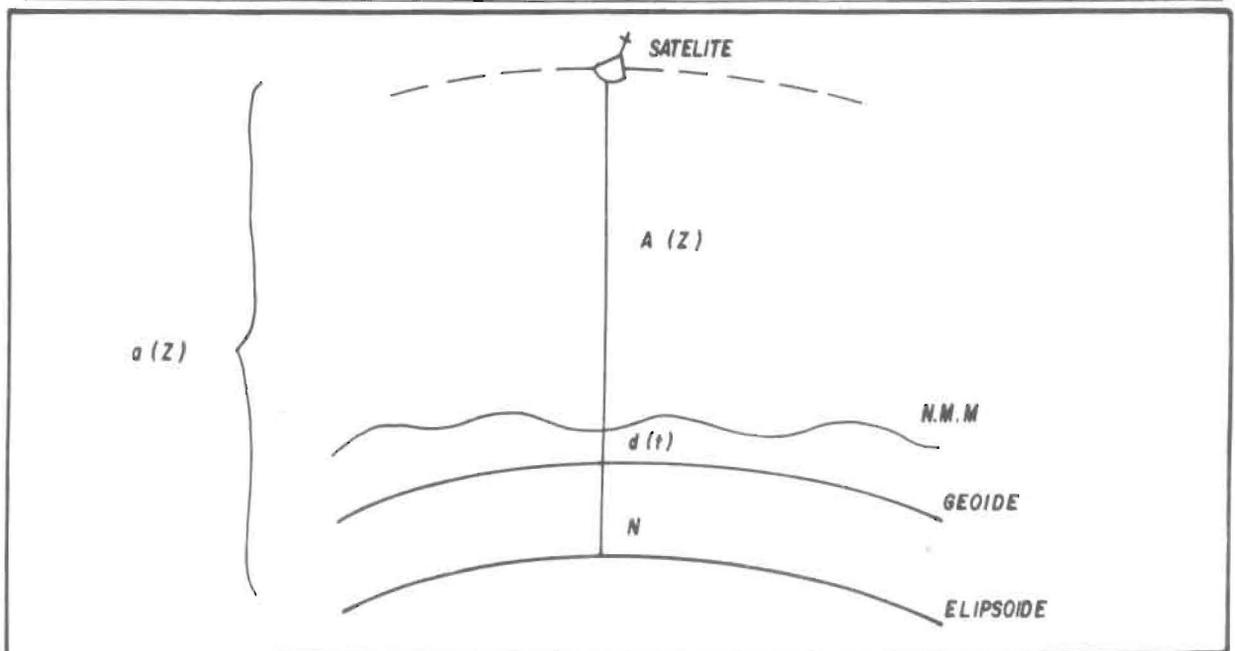


Figura No 5. Geometría de la medición en la técnica altimétrica

Con esta moderna posibilidad de medición se puede definir un datum altimétrico, mediante dos alternativas de solución.

#### Alternativa 5A

Consideramos un perfil independiente de las estaciones mareográficas, por ejemplo, se escoge una zona media de la geografía venezolana, donde exista información geodésica, tal como una cadena de triangulación o cualquier circuito de nivelación.

Para cada estación sobre la cual se efectúan mediciones GPS se formará una ecuación de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} h_1 &= H_1 + N_1 \\ h_2 &= H_2 + N_2 \\ \Delta h &= h_2 - h_1 = (H_2 - H_1) + (N_2 - N_1) \end{aligned} \quad (7)$$

En una compensación podrían incluirse los valores para cada punto: el  $\Delta h$  se obtiene por mediciones GPS y  $\Delta H$  mediante la nivelación, de ser posible, podría corroborarse si se conoce  $\Delta N$  a partir de la integral de Stokes.

La exactitud de los parámetros es compatible, el  $\Delta h$  alcanza el orden de los mm - cm y  $\Delta H$  el de los mm. El procedimiento puede utilizarse

para determinar  $\Delta N$  entre varios puntos a partir de GPS y nivelación y estará referido al elipsoide en el cual se calculan las efemérides del satélite.

#### Alternativa 5B

El datum altimétrico se puede determinar utilizando estaciones mareográficas y mediciones GPS, vinculadas por la nivelación geodésica o por el posicionamiento satelital en forma diferencial.

Si se considera que el datum vertical debe estar referido a las estaciones mareográficas y además el nivel medio del mar sea coincidente con el geoide, se justifica la siguiente relación en el punto origen P, si el geoide y el elipsoide se suponen coincidentes:

$$h_1 = H_1 \quad \text{si} \quad N_1 = 0 \quad (8)$$

Para otro punto P2 sobre la superficie de la tierra se tiene:

$$h_2 = H_2 + N_2 = H_1 + \Delta H_{12} + N_2 \quad (9)$$

al definir a P1 como origen del sistema  $H_1 = 0$ ,  $h_2$  se obtiene por mediciones GPS,  $\Delta H_{12}$  por nivelación y  $N_2$  por un modelo de gravedad.

Si se consideran dos estaciones mareográficas al nivel medio del mar, el  $\Delta H_{12}$  tiende a cero,

$$h_1 = H_1 + N_1$$

$$h_2 = H_2 + N_2$$

Sea  $\Delta H_{12} = H_2 - H_1$  la diferencia de altura entre los puntos con respecto al mareógrafo que define el nivel medio del mar,

$$H_2 = H_1 + \Delta H_{12} = h_1 - N_1 + \Delta H_{12} \quad (10)$$

Pero  $H_1$  debe ser igual a cero debido a la consideración de coincidencia del geoide con el nivel medio del mar definido. En cada estación mareográfica se formará una ecuación de este tipo,

$$H_n = h_n - N_n + \Delta H_{n-(n-1)} = 0 \quad (11)$$

El sistema se extiende a cada estación mareográfica, vinculada o no con la nivelación y por mediciones satelitares puntuales o diferenciales.

El ajuste de los diferentes tipos de observaciones se procesaría por el método de colocación por mínimos cuadrados. Las mediciones de gravedad son otro tipo de observación que ayudaría a complementar el conocimiento del campo de gravedad mediante la determinación de  $N$  lo cual podría conducir a un ajuste geodésico integrado para la definición de un datum vertical (Hein [5], 1985).

Combinando todos los datos geodésicos disponibles para tratar convencional y modernamente el problema del datum vertical:

- observaciones mareográficas
- observaciones altimétricas cercanas a las estaciones mareográficas
- observaciones de gravedad absoluta
- observaciones de diferencia de potencial (datos de nivelación combinada con observaciones de gravedad)
- anomalías de gravedad y deflexiones de la vertical

- mediciones GPS

## Conclusiones

Debido a diferentes factores, entre ellos la falta de mantenimiento de los mareógrafos y la ausencia de mediciones de vinculación entre los mismos, el plano de referencia para las alturas producto de las mediciones mareográficas no es totalmente confiable en Venezuela.

Los diferentes datums locales que existen como origen de las redes verticales, generan confusiones y discrepancias en las mediciones efectuadas en regiones extensas del país.

Los errores sistemáticos que se presentan en la determinación del NMM, se transfieren a la red vertical y a su vez se acumulan distorsionando la misma.

Es imperativa una evaluación detallada y oficial del datum vertical venezolano y de la red de alturas vinculado al mismo, para lo cual deben considerarse los conceptos y procedimientos más modernos que existen al respecto.

## Referencias bibliográficas

- 1.- ALMEIDA, Nieves; CORCEGA, Morelic y HERMANDEZ, Mercedes: "Evaluación de la Red Nacional Básica de Nivelación Establecida por la D. C. N." Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería U.C.V., Caracas, 1989.
- 2.- BOMFORD, G. : "Geodesy", Oxford University Press, Oxford, 1980.
- 3.- COLOMBO, Oscar : "Levelling with the Help of Space Techniques" and "Transoceanic Vertical Datum Convention" Proceedings Second International Symposium on Problems Related to the Redefinition of NAVD, Ottawa, 1980.
- 4.- FUBARA, D. and MOURAD, A. : "Impact of Satellite Altimetric on Geodetic Datum Definition", International Symposium on Problems Related to the Redefinition of NAVD, the University of New Brunswick, Canadá, 1974.
- 5.- HEIN, G. and EISELLER, B.: "Vertical Datum Definition by Integrated Geodesy Adjust-

- ment", Third Internâional Symposium on the NAVD, Rockville, Maryland, 1985.
- 6.- HOYER, M. : "La Transformación entre el Datum Venezolano La Canoa y el Datum Satelitar WGS-72", Trabajo de Ascenso, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1986.
- 7.- MOLINES, Jean : "Análisis Armónico de Registro de Niveles y Predicciones de Mareas en el Lago de Maracaibo", Universidad del Zulia, Maracaibo, 1985.
- 8.- SEEBER, G. : "Satellitengeodäsie" Editorial de Gruiter, Berlin, 1988.
- 9.- TORGE, W. : "Geodesy", Editorial de Gruiter, Berlin 1980.

Recibido el 30 de Octubre de 1991

En forma revisada el 21 de Enero de 1993