

Construcción de la superficie hidrográfica de referencia vertical para las bahías de Buenaventura y Málaga, Pacífico colombiano

Construction of the reference (vertical) hydrographic surface for the bays of Buenaventura and Málaga, Colombian Pacific

DOI: 10.26640/22159045.438

Fecha de recepción: 2018-02-12 / Fecha de aceptación: 2018-04-12

Merly C. Alvarez M.*, Diego A. Pulido N.***, Leidy J. Solano T.*** y Fernando Oviedo B****

Alvarez, M., Pulido, D., Solano, L. y Oviedo, F. (2018). *Construcción de la superficie hidrográfica de referencia vertical para las bahías de Buenaventura y Málaga, Pacífico colombiano*. Bol. Cient. CIOH (36):53-69. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.438

RESUMEN

Se define la ruta metodológica usada en el proyecto "Red Hidrográfica de Referencia Vertical para los principales puertos marítimos colombianos", durante la generación del marco vertical de referencia denominado "Superficie Hidrográfica de Referencia Vertical (SHRV2016)" para las bahías de Buenaventura y Málaga en el Pacífico colombiano, a partir de tres componentes principales: la determinación matemática de *datums* verticales asociados a registros históricos de nivel de agua, el establecimiento de una red de vértices geodésicos de primer orden, y la medición de alturas en la superficie del mar con referencia al elipsoide WGS84 (World Geodetic System), empleando receptores del sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) en modo diferencial RTK (Real Time kinematic). Los puntos de referencia en tierra fueron utilizados para dar el control vertical de precisión hacia los *datums* en el agua, y a su vez para la instalación de receptores base GNSS encargados de enviar las correcciones diferenciales en tiempo real durante la medición de alturas en la superficie del mar. Estas mediciones junto a la densificación de *datums* verticales calculados para la zona, constituyeron la base en la elaboración de la SHRV2016, modelo que con una resolución espacial de 500 metros, refiere al elipsoide WGS84 los *datums* verticales de nivel de agua, y que además de estandarizar las mediciones que realizan los diferentes usuarios en las aguas jurisdiccionales relativas a un *datum* vertical; permite aprovechar las ventajas de la tecnología GNSS para realizar la medición y corrección de nivel de agua en tiempo real con el menor grado de incertidumbre posible durante la ejecución de levantamientos hidrográficos, optimizando tiempo, calidad y recursos, especialmente en lugares como las bahías de Buenaventura y Málaga, donde el régimen de marea hace compleja la actividad de corrección debido a la variabilidad en rango y fase propia del sector, lo cual obliga a instalar múltiples estaciones mareográficas, realizar tareas de topografía y geodesia en lugares de difícil acceso, y esperar al término del levantamiento hidrográfico para incluir los registros de las estaciones en la corrección final de las profundidades. En un mediano plazo, las SHRV permitirán la generación de un modelo completo de referencia de los *datums* de marea hacia el elipsoide, que abarque completamente los litorales y regiones insulares del país, hasta los límites del mar territorial, gracias a la combinación con datos de altimetría satelital e instrumentos de observación mar adentro como boyas GPS, que permitan la correcta fusión con los modelos generados a nivel local en cada una de las bahías y puertos.

* Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico – CCCP, San Andrés de Tumaco. Correo: malvarez@dimar.mil.com

** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico – CCCP, San Andrés de Tumaco. Correo: dpulido@dimar.mil.co

*** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico – CCCP, San Andrés de Tumaco. Correo: lsolano@dimar.mil.co

**** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico – CCCP, San Andrés de Tumaco. Correo: soviedobarrero@dimar.mil.co

PALABRAS CLAVE: Pacífico colombiano, Bahía Málaga, bahía de Buenaventura, referencia vertical, superficie hidrográfica, nivel medio del mar, pleamar media de sicigia, bajamar media de sicigia, marea astronómica más alta, marea astronómica más baja, altura de referencia, *datum* vertical.

ABSTRACT

The present paper defines the methodological path used in the project "Vertical Reference Hydrographic Network for the main Colombian maritime ports", during the generation of reference vertical frame called "Vertical Reference Hydrographic Surface (SHRV2016)" for Buenaventura and Malaga bays in the Colombian Pacific, based on three main components: the mathematical determination of vertical datums associated with historical records of the water level, the establishment of first order geodetic points network, and the measurement of sea surface heights with reference to the WGS84 ellipsoid (World Geodetic System), using GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers in differential mode RTK (Real Time Kinematic). The ground reference points were used to have precision vertical control to the datums in the water, and also for the installation of GNSS reference receivers, that were in charge of sending real time differential corrections during the measurement of sea surface heights. These measurements in connection to the calculated vertical datums densification for the area, formed the necessary basis for development the SHRV2016, a model with a spatial resolution of 500 meters, where all water level vertical datums refers to the WGS84 ellipsoid. In addition to standardize measurements made by different users in jurisdictional waters relative to a vertical datum; allowing to take advantage of the benefits of GNSS technology to perform the water level measurement and correction in real-time with the lesser degree of uncertainty during the execution of hydrographic surveying, optimizing time, quality and resources, particularly in places such as Buenaventura and Malaga bays, where the tidal regime makes complex the activity of correction due to the variability in range and phase of the sector, by which makes necessary install multiple tide stations, perform tasks of Surveying and Geodesy in difficult access places, and will wait for include tide gauge records in the final correction of the depths, only until the hydrographic survey will finish. In a medium term, the SHRV will allow the generation of a total tide datums reference model relative to the ellipsoid, covering completely the coastal and island regions of the country, up to the limits of the Territorial Sea, thanks to the combination with satellite altimetry data and observational offshore tools as GPS buoys, which allow the correct fusion with the local models generated in each one of the bays and harbors.

KEYWORDS: *Colombian Pacific, Bahia Malaga, Bahia Buenaventura, vertical reference, hydrographic surveys, mean sea level, mean high water springs, mean low water springs, highest astronomical tide, lowest astronomical tide, height reference, vertical datum.*

INTRODUCCIÓN

En Colombia el progreso en la determinación de alturas de referencia ha avanzado poco a poco desde los años cuarenta con el establecimiento de 35 estaciones de Laplace como base para el sistema de referencia horizontal local, 13 estaciones absolutas de gravedad y 4 mareógrafos instalados por el USCGS para la observación y predicción del nivel del mar con propósitos de navegación y definición de un *datum* vertical de referencia para la agrimensura en el país; estos últimos fueron instalados dos en el mar Caribe (Cartagena y Riohacha) y dos en el océano Pacífico (Buenaventura y Tumaco) (Sánchez, 2003).

Los registros de los mareógrafos de los años 1942-1959, permitieron el cálculo del nivel medio del mar que fue tomado como nivel de referencia para las líneas de nivelación medidas entre 1950 y 1957 (IGAC, 1960).

Con las estaciones de Laplace mencionadas y algunos puntos astronómicos complementarios, se calcularon deflexiones de la vertical para modelar un geoide astro-geodésico en 1962. Dichas deflexiones complementadas con observaciones gravimétricas e interpoladas para la mayoría del territorio colombiano, alcanzaron una precisión de $\pm 2''$ en las zonas montañosas y $\pm 6''$ en las planas. Estos cálculos se adelantaron sobre el *datum* local

(*Datum* Bogotá, elipsoide de Hayford), implicando que las ondulaciones geoidales fueran relativas y difícilmente comparables con modelos globales (Sánchez, 2003).

En 1978 se tomó como *datum* de referencia el nivel medio del mar calculado para Buenaventura, con 18 años de mediciones (1951-1968) de 7 estaciones mareográficas, debido a que se observó que el nivel registrado en el océano Pacífico era, aproximadamente, 28 cm más alto que el del Caribe (García y Cuervo, 1978). Este nivel del mar, obtenido de promediar los registros mareográficos, consiguió eliminar los cambios temporales periódicos de la superficie del mar, pero los no periódicos, los seculares y los generados por la topografía costera fueron ignorados.

La Defense Mapping Agency (DMA), actualmente conocida como National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) calculó en 1988 un modelo geoidal referido al elipsoide WGS84, con alturas geoidales modificadas para que fuesen compatibles con el *Datum* Bogotá. Los valores de este modelo resultaron un tanto exageradas, por lo que su utilidad práctica no fue efectiva (DMA, 1988).

El primer geoide calculado para Colombia por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), utilizó anomalías isostáticas derivadas de anomalías Bouguer para hacer la formulación de *Stokes*. No obstante, ya que las anomalías isostáticas se derivaron empíricamente y el efecto gravimétrico de la topografía fue omitido, los errores del modelo resultaron considerablemente altos (Martínez, Flórez y Sánchez, 1995).

En 1998 se obtuvo el modelo geoidal gravimétrico GEOCOL98, desarrollado a partir de anomalías Aire Libre procesadas por la fórmula *Stokes* como componente local y el modelo geopotencial EGM96 (Lemoine *et al.*, 1998) como componente global. En las áreas marinas se integró información gravimétrica registrada por embarcaciones geofísicas (Sánchez, 2003). Este modelo, con precisión relativa en torno a ± 80 cm, se usó en Colombia para derivar alturas clásicas referidas al *datum* de Buenaventura a partir de información GPS (Sánchez y Martínez, 2001). Sin embargo, debido a discrepancias encontradas en áreas montañosas (principalmente en el área de Los

Andes) entre las ondulaciones correspondientes a alturas GPS combinadas con nivelación diferencial y las derivadas del modelo gravimétrico, y con el fin de reducir estas diferencias y de permitir la combinación de datos GPS con redes de nivelación existentes, se calculó, en el año 2000, el modelo cuasi-geoide GEOCOL2001 bajo la teoría de Molodensky. La interpolación de las anomalías gravimétricas se hizo con valores de anomalía Bouguer total, es decir que se tuvo en cuenta la corrección topográfica, calculada con apoyo en el modelo ETOPO5 (NOAA, 1988). Sobre la tierra se utilizaron datos de gravedad terrestres y aéreos, y sobre las áreas marinas adyacentes se usó altimetría de satélite para estimar anomalías Faye. Las alturas obtenidas en comparación con alturas elipsoidales GPS y alturas niveladas, dieron como resultado menores amplitudes en los residuales y una mayor precisión del modelo (Sánchez y Martínez, 2001), no obstante, permanecían aún errores sistemáticos provenientes de la deficiente calidad de algunos de los datos gravimétricos utilizados (Sánchez, 2003).

Como consecuencia, un nuevo cálculo del cuasi-geoide y su geoide (derivado del segundo método de condensación de Helmert) en Colombia fue llevado a cabo en 2004 por el IGAC, de acuerdo con la Teoría de Molodensky y aplicando la técnica *remove/restore*. Para el efecto, se realizó un reajuste de las redes gravimétricas de referencia y se evaluó y redujo cada uno de los proyectos geofísicos proporcionados por la Empresa Colombiana de Petróleos Ecopetrol, de modo que fueran compatibles con el Sistema Gravimétrico Nacional SIGNAR. En las zonas marinas se incluyeron anomalías de gravedad derivadas de altimetría satelital, y para el análisis de los efectos gravitacionales de la topografía, se empleó un modelo digital de terreno (30"x30") de mayor resolución que los anteriores (Sánchez, 2003). El resultado fue un modelo de 2'x2' sobre Colombia y las áreas fronterizas inmediatas de sus países vecinos (las islas de San Andrés y Providencia no se incluyeron en el proceso), y aunque es de mayor resolución y calidad que los anteriores modelos, su precisión aún no fue suficiente para su aplicación directa en la agrimensura del país.

El modelo gravitacional EGM2008 (Pavlis, Holmes, Kenyon y Factor, 2012) es una solución combinada de datos derivados del satélite GRACE

(Gravity Recovery and Climate Experiment) y de una base de datos global de anomalía de gravedad con una resolución espacial de $5' \times 5'$. Este modelo, al combinar los datos terrestres, marinos y aéreos con los datos de satélite, alcanzó un alto orden del desarrollo en armónicos esféricos con la mayor resolución espacial para un modelo global de gravedad hasta el momento (Álvarez *et al.*, 2016).

Estos modelos de cuasi-geoide y geoide para Colombia y el mundo, sirven actualmente como superficies de referencia, que vinculadas a alturas físicas obtenidas de combinar datos gravimétricos con alturas niveladas, consistentes con alturas geométricas y elipsoidales, definen un Sistema Vertical y proporcionan alturas normales (cuasi-geoide) y ortométricas (geoide), usadas para fines que involucran principalmente a la topografía práctica en desarrollos de geodesia aplicada como cartografía, ingeniería, implementación de instalaciones, entre otras. Los sistemas verticales en Colombia han sido establecidos usando como nivel de referencia el Mean Sea Level (MSL) medido por el mareógrafo de Buenaventura en el océano Pacífico. (Sánchez y Martínez, 2001).

Las alturas elipsoidales, que también sirven como "alturas de referencia", tienen como objetivo central satisfacer los propósitos científicos y los requerimientos de redes globales (determinación de órbitas satelitales, correlación entre sistemas verticales internacionales, monitoreo de cambios en el nivel del mar, control de movimientos verticales de la corteza, etc.) (Sánchez y Martínez, 2001).

Aunque se han dado grandes pasos en la determinación de superficies de referencia, los *datum* verticales existentes no soportan los requerimientos de exactitud de la geodesia moderna. Están referidos a niveles locales (aislados) y son estacionarios (no consideran variaciones en el tiempo) (Sánchez, 2009). Con todas estas carencias en la formulación de un *datum* vertical confiable, la Dirección General Marítima (Dimar) en cabeza del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, estableció la metodología para la implementación de la Superficie Hidrográfica de Referencia Vertical (SHRV2016) en las bahía de Buenaventura y Málaga del Pacífico colombiano, con miras a extenderse inicialmente a todos los puertos marítimos del país y, posteriormente, a las áreas marinas adyacentes a la línea costera.

Esta metodología inició en el año 2016, con la instauración de la red geodésica compuesta por 11 puntos de primer orden, los datos de nivel de agua obtenidos durante un año de registros continuo de 3 estaciones mareográficas permanentes y 3 meses de 2 estaciones temporales portátiles, y la información de la grilla de puntos resultante de un levantamiento diferencial RTK con tecnología GNSS en la superficie del mar con cobertura total de las bahías de Buenaventura y Málaga; información a la que después de aplicar correcciones por tiempo y ajustes del cero de onda mareal para que exista consistencia entre las 5 estaciones mareográficas, y de calcular los *datum* verticales para cada estación y propagarlos hasta cada punto del levantamiento diferencial, permitieron la obtención de las alturas de referencia Highest Astronomical Tide (HAT)¹, Mean High Water Springs (MHWS), Mean Sea Level (MSL), Mean Low Water Springs (MLWS) y Lowest Astronomical Tide (LAT)¹, interpoladas mediante el método Kriging a toda el área de estudio y referidas al elipsoide WGS84, que finalmente conforman la SHRV2016 con una precisión horizontal de ± 5 cm y una precisión vertical de ± 6 cm.

A nivel internacional, la creación de modelos de separación fue iniciada por Canadá en 1996 por el Servicio Hidrográfico Canadiense, usando modelos hidrodinámicos y datos de altimetría satelital para determinar la separación entre el *Datum* de la Carta y el *Datum* WGS84. Un proyecto similar llamado AUSHYDROID (Martin y Broadbent, 2004), fue llevado a cabo en Australia en 2004, desarrollado mediante mediciones GPS con respecto al International Terrestrial Reference Frame (ITRF), utilizando zonificación en altamar y mareógrafos en la costa. Estados Unidos lanzó en 2002, el modelo de separación VDatum (Parker, Milbert, Hess y Gill, 2003), desarrollado por la United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) como herramienta de transformación de *datum* vertical, que permite la transformación de datos de elevación batimétricos y/o topográficos entre 28 *datums* ortométricos, elipsoidales/3-D, y mareales diferentes. VDatum integra nuevas tecnologías como el GPS cinemático en tiempo real y batimetría y topografía LiDAR.

1 Contrario a la definición de los *datum* mareales HAT y LAT que los sitúa esencialmente como el promedio de todas las elevaciones del agua (sobre o bajo el nivel medio) para un período de 18.6 años, el cálculo del HAT y LAT de que trata este artículo se refiere a las alturas derivadas de 1 año de datos reales con inclusión de la marea meteorológica.

El proyecto Vertical Offshore Reference Frame (VORF) (Iliffe, Ziebart, Turner, Oliveira y Adams, 2006), comisionado por la Oficina Hidrográfica de Reino Unido en 2005 y desarrollado por el departamento de Ingeniería Geomática de la UCL, tuvo como objetivo modelar el *Datum* de la carta y otras superficies mareales como una superficie continua respecto al ETRF89 y ITRF2000, determinando además la superficie media del mar en la época de referencia 2000 con respecto al ETRF89. Esto fue hecho usando mediciones mareográficas a lo largo de las costas y datos de altimetría satelital en alta mar, combinados mediante la interpolación de la Superficie Topográfica del Mar por colocación de mínimos cuadrados.

La SHRV2016 constituye un modelo de separación vertical destinado esencialmente a ser una herramienta de transformación que simula una superficie de referencia vertical y las diferencias entre esta superficie y todos los *datum* verticales. Para el caso, la superficie de referencia apropiada es el elipsoide WGS84, que actúa como

un medio para facilitar la transformación desde un datum vertical a otro (Davis, Nanlal, Sutherland y Sutherland, 2011).

ÁREA DE ESTUDIO

La zona abarca las bahías de Buenaventura y Málaga en el departamento del Valle del Cauca, ubicadas en el municipio de Buenaventura. El área está comprendida entre la playa de Ladrilleros (latitud: $3^{\circ}56'38,553''$ N, longitud: $77^{\circ}22'3.54''$ W) al norte y el sector de Las Palmas (latitud: $3^{\circ}43'57.312''$ N, longitud: $77^{\circ}11'49.044''$ W) al sur sobre la línea de costa. Desde la línea de costa hacia mar adentro se extiende alrededor de 15 km hasta los puntos marítimos coordinados latitud: $3^{\circ}56'35.495''$ N y longitud: $77^{\circ}27'58.174''$ W para el punto norte, latitud: $3^{\circ}51'42.005''$ N y longitud: $77^{\circ}27'58.174''$ W para el punto medio, latitud: $3^{\circ}43'45.083''$ N y longitud: $77^{\circ}21'48.254''$ W para el punto sur. Adicionalmente, se extiende 500 metros costa adentro para asegurar el cubrimiento total del área (Figura 1).

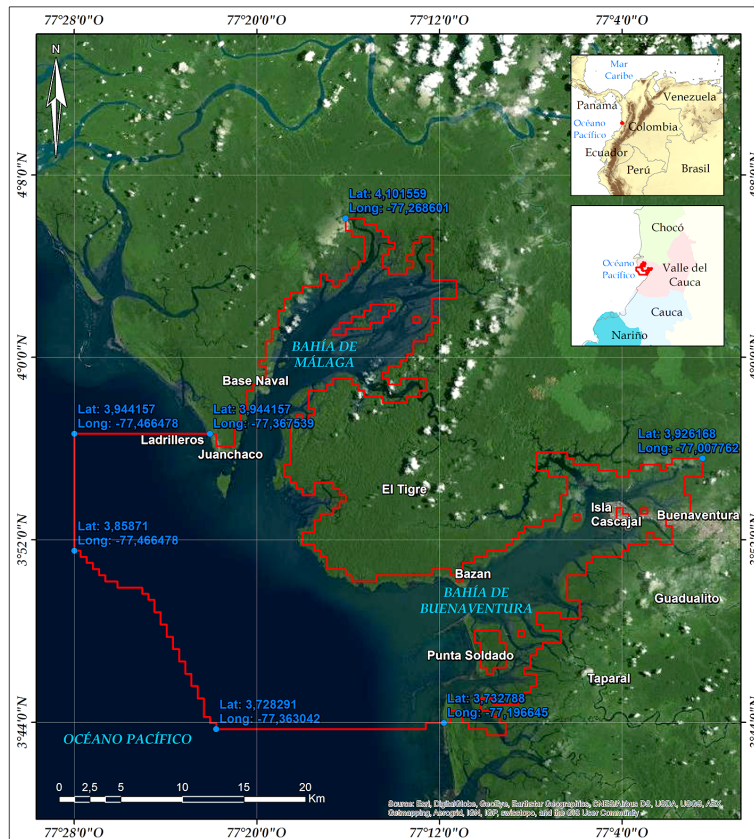


Figura 1. Mapa de la zona de estudio.

Geomorfológicamente, en el área predominan las lomas y colinas con pendientes tanto abruptas como suaves, características de la bahía de Málaga y la parte norte de la bahía de Buenaventura. Al sur de la isla Cascajal, el terreno se caracteriza por ser una planicie deltaica con zonas planas a levemente onduladas y estables que no reciben inundación constante, cuyo origen se debe a la depositación fluviomarina de sedimentos. En general hay presencia de pocas playas de arena fina a lo largo de las bahías (Álvarez Machuca, Bermúdez Rivas y Niño Pinzón, 2018).

METODOLOGÍA

Datos

La Superficie Hidrográfica de Referencia Vertical se calculó a partir de datos provenientes de un componente mareográfico y uno geodésico. En el caso mareográfico se contó con la cuantificación de los *datums* verticales de nivel de agua LAT, MLWS, MHWS, HAT y MSL, a partir de series temporales de nivel de agua observadas minuto a minuto por un periodo de un año en tres estaciones mareográficas permanentes de Dimar (BV [03°53'29.84"N, 77°04'54.18"W] ubicada en Muelle Semap Buenaventura, JC [03°54'54.79"N, 77°21'32.70"W] en un islote frente a Juanchaco bahía Málaga, y BM [03°58'20.55"N, 77°19'40.41"W] en la Base Naval de la bahía Málaga) y tres meses de datos de dos sensores portátiles temporales (MB [03°49'57.25"N, 77°10'45.94"W] ubicado en el Muelle de Bazán Bocana en la bahía de Buenaventura y B4 [03°47'34.28"N, 77°18'05.83"W] ubicada en la Boya No.4 del canal de acceso a Buenaventura), los últimos instalados estratégicamente para cubrir equidistantemente el área marítima de las bahías que no es observada por las estaciones permanentes.

En el componente geodésico se contó con la información proveniente del levantamiento de alturas elipsoidales realizado a bordo de lancha hidrográfica sobre la superficie de agua en modo diferencial RTK, utilizando receptores GNSS en seguimiento de una grilla espaciada horizontalmente a 1 kilómetro para las partes internas de la bahía y a 2 kilómetros en el sector externo, en la cual se obtuvieron 200 puntos

extendidos espacialmente en los 808.05 km² (311.99 millas) de las bahías. Los vértices geodésicos de referencia donde se instalaban los receptores GNSS base para la realización del levantamiento RTK correspondieron a la red compuesta por 11 puntos geodésicos de primer orden materializados con el fin de soportar el control vertical y horizontal de los *datums* de nivel de agua.

Tratamiento de las señales de marea

Las observaciones anuales del nivel del mar de las estaciones mareográficas de Dimar, fueron invaluable para reconocer los sesgos meteorológicos y estacionales, y poder aplicarlos a la reconstrucción de las observaciones a corto plazo. Sobre las señales mareales reales se aplicaron filtros para eliminar ruido, suavizar las ondas y eliminar datos atípicos.

Los datos de tres meses se reconstruyeron a un año basándose en los coeficientes armónicos resultantes de analizar y tratar las señales de onda de los datos genuinos.

Con las señales limpias se calcularon los niveles mareales referidos al cero de la estación mareográfica permanente con mayor amplitud de marea, correspondiente al MLWS=0.

Instalación de la red geodésica de primer orden

La red de vértices geodésicos materializada mediante 11 puntos tipo pilastra e incrustación, se distribuyó homogéneamente en el área de estudio sobre lugares que cumplieran condiciones favorables en los siguientes aspectos: estabilidad y firmeza del terreno, fácil acceso, seguridad, apartado de posibles obstáculos que interfieran con la correcta adquisición de datos GPS, cercanos a la línea de costa buscando que las nivelaciones no superen los 500 metros en sus recorridos totales y suficiente altura para instalación de estaciones base en trabajos RTK. La solución final de coordenadas asignada a cada uno de estos vértices se basó en el método de levantamiento estático, realizando post proceso de datos crudos recolectados por receptores GNSS TOPCON GR3 que ofrece una precisión horizontal de 3 mm + 0.5ppm, y una precisión vertical de 5 mm + 0.5ppm para este tipo de

levantamiento. Las estaciones de referencia utilizadas como puntos de control durante el procesamiento, generación de líneas base y triangulaciones que permitieron garantizar la calidad de los datos finales correspondieron a la Red Nacional de Estaciones Geodésicas Satelitales GPS – GEORED del Servicio Geológico Colombiano.

Para el cálculo de las coordenadas fiduciales desde la época de referencia a la época de observación, las coordenadas asociadas a la época de referencia para Colombia se trasladaron desde 1995 al día en que se hizo el levantamiento GNSS, 2016 para Buenaventura y Málaga, con ayuda del modelo de velocidades VEMOS2009 (Drewes y Heidbach, 2009).

Obtención de alturas elipsoidales de la superficie mareal

El levantamiento diferencial Real Time Kinematic (RTK) de alturas elipsoidales de nivel del mar fue realizado en una grilla de puntos distribuidos en la totalidad del área de estudio, estableciendo como límite el alcance en línea recta (12 kilómetros en promedio) de la señal diferencial RTK transmitida desde cada uno de los vértices de control usando receptores GNSS Leica GX1230 de doble frecuencia, hasta el receptor móvil ubicado en la embarcación donde se efectuó la toma de alturas. Los puntos fueron distribuidos con espaciamiento entre 1 y 2 km, sin embargo, el excesivo oleaje en aguas poco profundas no permitió el registro adecuado en esos sectores (Figura 2).

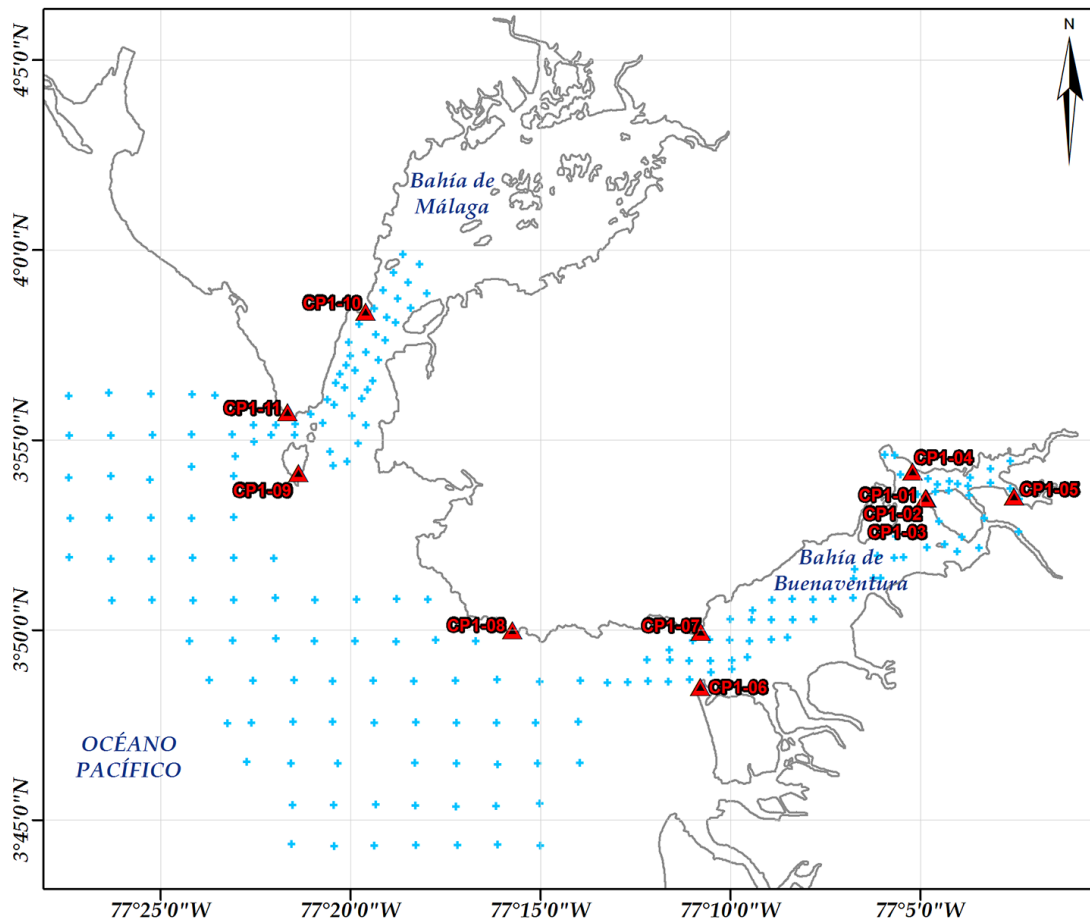


Figura 2. Nube de puntos del levantamiento GNSS. Vértices geodésicos sobre la costa.

Una vez finalizada la toma de alturas elipsoidales de la superficie del mar, se eliminaron los datos que superaron una incertidumbre total combinada (error horizontal en X y Y combinado con el error vertical en Z) de 0.1 m. Estas alturas elipsoidales tomadas en diferentes tiempos de ocurrencia y en su defecto en diferentes alturas de nivel de agua, fueron corregidas y llevadas al mismo cero de referencia mediante los registros del mareógrafo más cercano, para luego adicionar los valores de *datum* verticales correspondientes para cada ubicación.

Generación de la SHRV2016

En Colombia, la costa Pacífica presenta macromareas que evidencian rangos mareales que exceden los 4 m y en donde las corrientes de marea dominan los procesos activos, la costa Caribe por el contrario, presenta micromareas con rangos mareales inferiores a los 2 m en donde la acción de las olas domina los procesos activos. De acuerdo con la frecuencia, la costa Pacífica exhibe mareas semidiurnas, es decir, produce dos pleamares y dos bajamares, mientras la costa Caribe presenta mareas mixtas, con una evidente desigualdad diurna en la elevación de las pleamares y bajamares entre ciclos de marea sucesivos (NOAA, 2017).

La presencia de rangos de marea superiores en la costa Pacífica, requirió la estimación de las variaciones de la marea a lo largo de las bahías de Málaga y Buenaventura, contando no solamente con las mareas procesadas para los 5 mareógrafos (datos discretos), sino además con las superficies de interpolación de los *datum* de cada estación mareográfica (datos continuos), todos estos siendo datos de marea relativos al cero de la estación mareográfica con mayor amplitud de marea que para las bahías fue BV [03°53'29.84"N, 77°04'54.18"W] en la isla Cascajal de la bahía de Buenaventura.

Las mareas procesadas para cada estación mareográfica, referidas al MLWS=0 de BV (Tabla 1), mostraron mayor amplitud mareal en BV con 5.64 m, seguido por BM con 5 m, MB con 4.91 m, JC con 4.80 m y por último B4 con 4.54 m. El valor relativo del MSL sobre el cero de la estación BV, constante a lo largo del área, expuso un nivel medio del mar de 2.41 m.

Tabla 1. *Datums* relativos al MLWS=0 de la estación mareográfica BV.

Estación mareográfica	LAT	MLWS	MSL	MHWS	HAT
BV	-0.41	0	2.41	4.73	5.23
JC	0.07	0.42	2.41	4.4	4.87
BM	0.02	0.33	2.41	4.52	5.02
MB	-0.13	0.32	2.41	4.51	4.78
B4	0.13	0.49	2.41	4.33	4.67

Con los niveles relativos de los 5 mareógrafos se interpoló el área para generar valores más aproximados de las variaciones mareales en toda el área. La interpolación espacial se hizo sobre cada *datum* mareal, obteniendo 5 superficies de *datums* relativos. En la Figura 3 la superficie del *datum* MLWS ilustra el constante cambio que va presentando el rango de la marea, registrando magnitudes menores en las partes externas de las bahías de Málaga y Buenaventura, y aumentando este valor conforme se avanza en dirección hacia los sectores más internos de estas.

Así, teniendo en cuenta que durante el levantamiento de alturas elipsoidales de nivel de agua, las estaciones mareográficas se encontraban simultáneamente registrando información referida a los *datum* relativos de las superficies mencionadas, se obtuvo el valor final de altura elipsoidal referida al elipsoide WGS84 en cada uno de los puntos levantados (*K*), mediante la ecuación 1.

$$K = [(A_t - B) - (W_t - D)] \quad (1)$$

Donde:

A_t: altura elipsoidal de la antena del receptor móvil al momento de la observación T1.

B: altura de la antena del receptor móvil respecto a la línea de agua (valor fijo).

W_t: altura de la superficie de agua registrada por sensor mareográfico respecto a su cero de mediciones al momento de la observación T1.

D: valor del datum seleccionado respecto al Cerro de mediciones de la estación mareográfica (valor fijo desde que se determinan datum verticales).

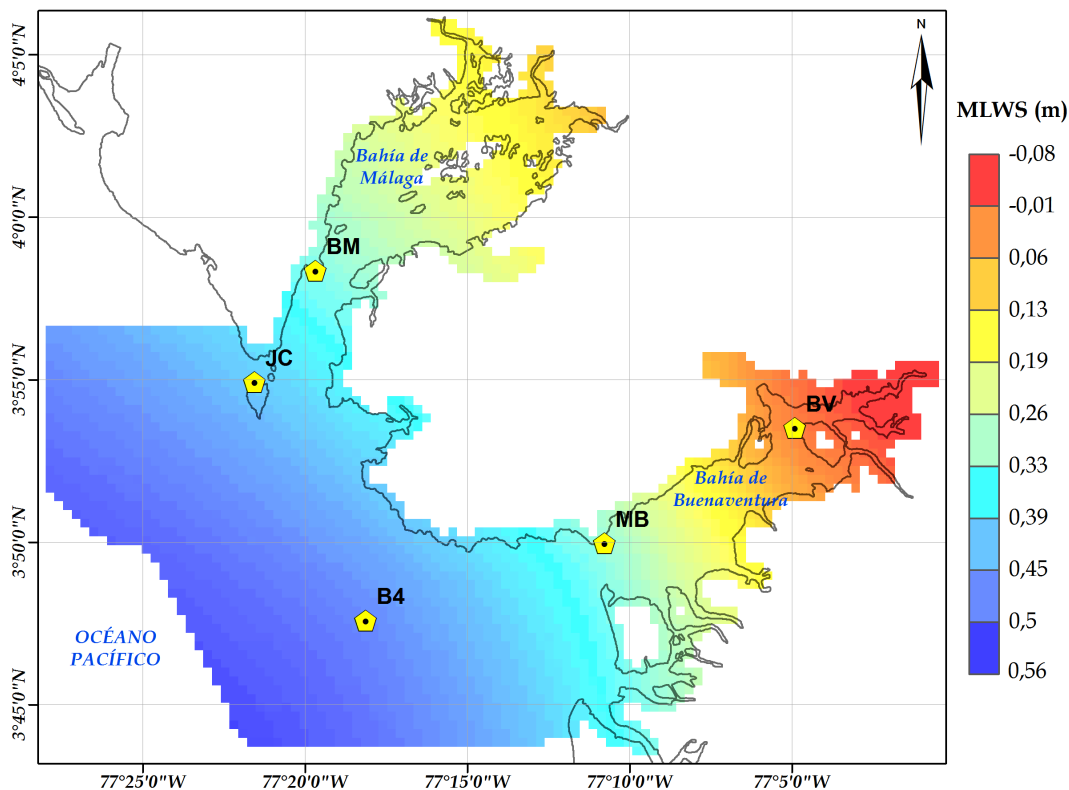


Figura 3. Estaciones mareográficas. Superficie con alturas relativas referidas al MLWS=0 de la estación de BV en la Isla Cascajal de Buenaventura.

Para lograr una resolución espacial de celda de 500 m, fue necesario representar cada marco de referencia mareal como una superficie continua respecto al elipsoide WGS84, usando el método de interpolación Kriging bayesiano empírico, basado en un conjunto de funciones encargadas de cuantificar la contribución local de cada punto. Para las zonas de las bahías con poca profundidad, o con aguas agrestes, donde el levantamiento RTK GNSS no fue viable por la dificultad en la medición de niveles de agua, se generaron nuevas alturas a través de la medición de la separación entre el datum y el geoide que mejor se ajustó a la zona, que para las bahías fue el modelo GEOCOL2004 (Sánchez, 2003) del IGAC, extrapolando los datos con la misma técnica de interpolación espacial para conseguir un cubrimiento total del área.

Datum de carta náutica

Mientras que en Colombia se usa el MLWS como *Datum* de la carta, Organización Hidrográfica Internacional (OHI) recomienda que la Bajamar Astronómica más Baja (LAT) sea adoptada por los servicios hidrográficos como *datum* de la carta. Sin embargo, en zonas específicas donde los niveles de bajamar se desvían frecuentemente de la LAT, otro *datum* similar puede ser usado alternativamente (OHI, 2017).

Las alturas del *datum* de la carta modelado respecto al elipsoide WGS84 fueron calculadas para permitir una variedad de realizaciones, destacándose la generación de aplicaciones hidrográficas, observaciones y predicciones de marea, y cartas náuticas.

Superficie topográfica del mar

La diferencia entre el geode y el MSL derivado marealmente, debida a las corrientes permanentes y efectos meteorológicos medios, denominada superficie topográfica del mar (SST, por sus siglas en inglés), permitió evaluar la precisión de la SHR2016 con modelos geoidales existentes. Para el caso se generó la SST para los modelos geoidales GEOCOL2004 y EGM2008 que cuentan con resolución y precisión diferentes (Tabla 2), pero que permitieron constatar la tendencia de la SHR2016

Tabla 2. Resolución espacial y precisión. GEOCOL y EGM vs SHR2016.

	GEOCOL 2004	EGM 2008	SHR 2016
Resolución espacial	3600 m (2'x2')	9000 m (5'x5')	500 m (18"x18")
Precisión	±0.80 m	±0.15 m	±0.06 m

RESULTADOS

La SHR representa un avance fundamental en la asimilación y uso de datos proveídos en marcos de referencia verticales diferentes al *datum* de carta usado generalmente. También favorece a la topografía de alta precisión con GPS y LiDAR para determinar líneas de costa definidas marealmente, modelado de oleada de tormenta, estudios de aumento del nivel del mar, estudios ecosistémicos, manejo de zonas costeras y planeación de la mitigación de desastres proactivos. Además, cualquier actividad marítima que involucre mediciones referidas a un determinado nivel o *datum* de marea, tales como levantamientos hidrográficos, producción cartográfica náutica, navegación marítima, obras marítimas (dragados, relimpias, diseños de canales navegables, áreas de maniobra, fondeo, muelles, puentes, protección costera, entre otros), gestión de la señalización marítima, generación de pronósticos de marea, definición de fronteras marítimas, entre otras.

El modelo de separación vertical generado a partir de las mediciones en tierra y en altamar, implementando técnicas de modelado

e interpolación para relacionar los *datums* verticales con la superficie elipsoidal de referencia (WGS84), se compuso de cinco superficies hidrográficas representando cada *datum* vertical, tal como se muestra en el la Figura 4.

Respecto al *datum* de la carta actualmente usado en Colombia (MLWS), representa alturas de aproximadamente 13 m en la separación del elipsoide y el *datum*, con variaciones entre 11.28 m, al oeste de Juanchaco y Ladrilleros, y 15.59 m, al interior de la bahía de Buenaventura.

Para evaluar los resultados de la SHR2016 se realizaron diferentes comparaciones. El primer método consistió en contrastar la altura elipsoidal del nivel del mar más cercano a cada vértice geodésico dada por la nivelación trigonométrica con estación total Leica Viva TS15 con precisión horizontal y vertical de ±4 mm, y las alturas dadas por la interpolación espacial producto del levantamiento GNSS RTK, obteniendo discrepancias menores o iguales a los 9 cm, como se exhibe en la Tabla 3. El segundo método involucró la comparación del área común de la SHR con los modelos GEOCOL2004 y EGM2008.

Las comparaciones de las alturas del nivel medio del mar (MSL) con las ondulaciones geoidales (N) de los modelos GEOCOL2004 y EGM2008 encajaron bastante bien para la zona en general. Las diferencias arrojaron un mayor ajuste entre el MSL y el modelo GEOCOL2004 calculado para Colombia, esta correlación (diferencias por debajo de los 50 cm) se debió a que para la generación de GEOCOL se tomó como *datum* de referencia el nivel medio del mar calculado en Buenaventura. En la Tabla 4, las estaciones mareográficas sirvieron como puntos para cotejar las separaciones entre los geoides y el MSL (Superficie Topográfica del Mar).

La generación de perfiles permitió verificar gráfica y cuantitativamente la correlación que existe entre los modelos geoidales (EGM2008 y GEOCOL 2004) y el *datum* MSL, al igual que la variabilidad existente para la separación elipsoide-*datums* a lo largo del área de estudio, confirmando que respecto a esta última variable, para el área general de las bahías de Buenaventura y Málaga no es posible asumir un único valor de separación como fuente para el desarrollo

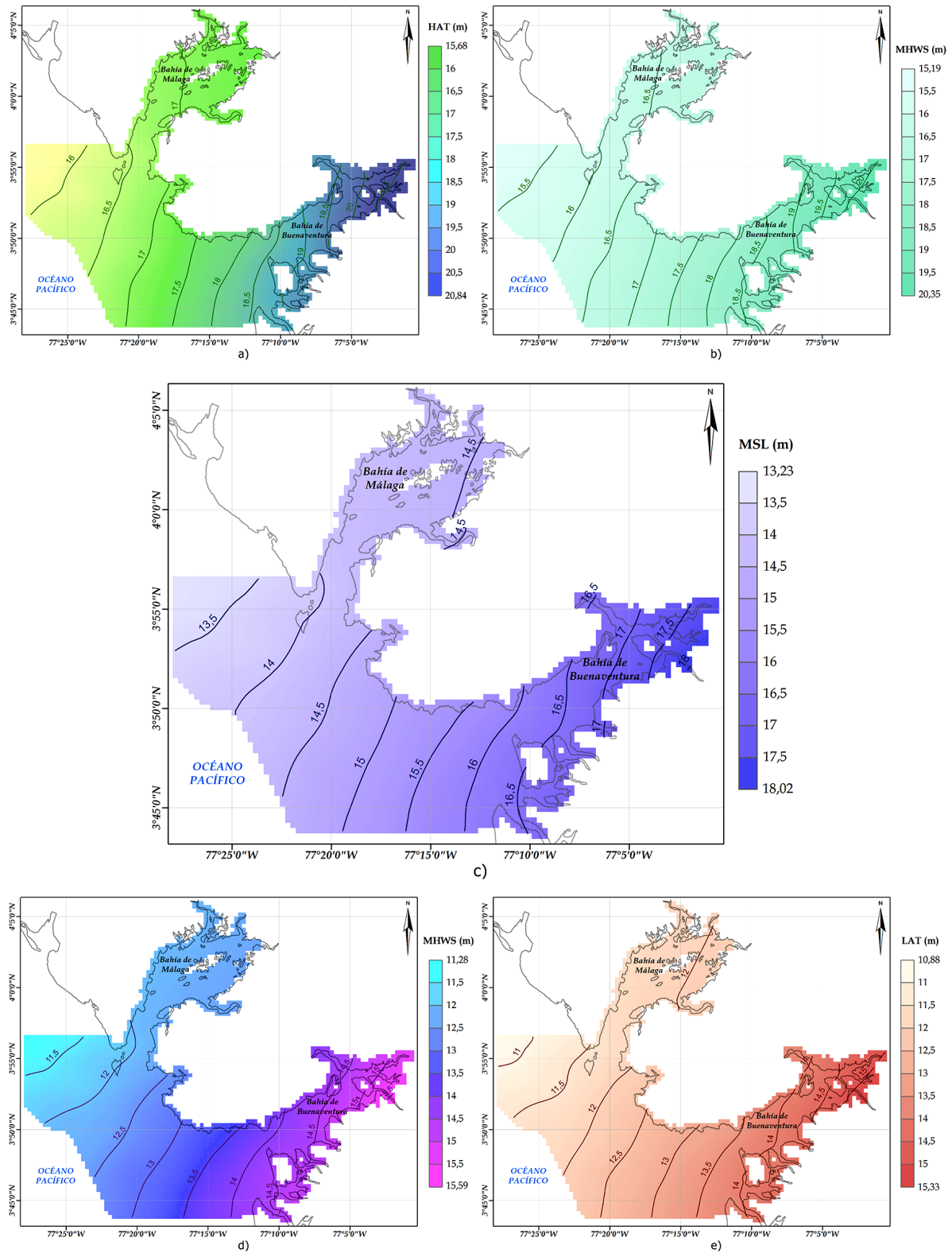


Figura 4. Superficies de los Datum verticales referidos al elipsoide WGS84: a). Superficie de la pleamar astronómica más alta. b). Superficie del promedio de las pleamares de sicigia. c). Superficie del nivel medio del mar. d). Superficie del promedio de las bajamares de sicigia. e). Superficie de la bajamar astronómica más baja.

Tabla 3. Control vertical aplicado sobre el espejo de agua más cercano a cada vértice geodésico.

Vértice	Altura elipsoidal Nivelación trigonométrica					Altura elipsoidal Interpolación SHRV					Diferencia alturas elipsoidales (Incertidumbre del modelo)				
	MSL	MLWS	MHWS	HAT	LAT	MSL	MLWS	MHWS	HAT	LAT	DIF. MSL	DIF. MLWS	DIF. MHWS	DIF. HAT	DIF. LAT
CP1-01	17.11	14.70	19.43	19.92	14.36	17.04	14.64	19.35	19.85	14.31	0.07	0.06	0.08	0.07	0.05
CP1-02	17.11	14.70	19.43	19.92	14.36	17.04	14.64	19.35	19.85	14.31	0.07	0.06	0.08	0.07	0.05
CP1-03	17.13	14.72	19.45	19.94	14.38	17.04	14.64	19.35	19.85	14.31	0.08	0.07	0.09	0.08	0.06
CP1-04	16.98	14.57	19.30	19.80	14.26	16.90	14.50	19.22	19.71	14.18	0.08	0.07	0.08	0.09	0.08
CP1-05	17.57	15.16	19.92	20.42	14.86	17.60	15.16	19.95	20.46	14.90	-0.03	0.00	-0.03	-0.04	-0.04
CP1-06	16.17	14.09	18.25	18.52	13.70	16.21	14.14	18.29	18.57	13.74	-0.04	-0.05	-0.04	-0.05	-0.04
CP1-07	15.96	13.87	18.06	18.34	13.47	15.91	13.82	18.02	18.30	13.44	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03
CP1-08	15.15	13.15	17.15	17.49	12.77	15.20	13.20	17.20	17.54	12.82	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
CP1-09	14.04	12.06	16.02	16.48	11.70	14.06	12.07	16.05	16.50	11.72	-0.02	-0.01	-0.03	-0.02	-0.02
CP1-10	14.19	12.11	16.30	16.80	11.79	14.17	12.09	16.28	16.78	11.77	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
CP1-11	13.78	11.78	15.79	16.27	11.43	13.84	11.84	15.85	16.33	11.49	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06

Tabla 4. Alturas topográficas del mar en las estaciones mareográficas de las bahías.

Estación mareográfica	MSL	NGEOL2004	NEGM2008	NGEOL2004 - MSL	NEGM2008 - MSL
BV	17.04	17.48	15.91	0.44	-1.13
JC	13.92	14.39	13.11	0.47	-0.81
BM	14.14	14.41	13.15	0.27	-0.99
MB	15.91	16.61	15.10	0.7	-0.81
B4	14.97	15.56	14.14	0.59	-0.83

de proyectos y trabajos que involucren fusión entre levantamientos terrestres y batimétricos, así como corrección de nivel de agua en levantamientos hidrográficos por método de marea GPS entre otros. En la Figura 5, el perfil 1 proyectado en el área externa de las bahías,

arroja que el MSL mantiene una tendencia de comportamiento similar a los modelos geoidales, sin embargo, las magnitudes de ondulación (separación hacia el elipsoide) difieren en -0.5 metros en promedio respecto al GEOCOL 2004 y +1 metro respecto a EGM2008; la variabilidad

general de separación elipsoide-*datums* para este perfil de 40 kilómetros de longitud en dirección sureste es de 3.5 metros aproximadamente, lo anterior debido a su perpendicularidad respecto a las isolíneas de ondulación geoidal. El perfil 2 proyectado en dirección noreste desde la parte externa, acceso y sector interno de la bahía de Málaga, mantiene la tendencia general de comportamiento similar a los modelos geoidales y las diferencias de magnitud de ondulación en el orden de los -0.5 metros respecto a GEOCOL 2004 y +1 metro respecto a EGM2008; La variabilidad general de separación elipsoide-*datums* para este perfil de 35 kilómetros

de longitud es de apenas unos 0.4 metros aproximadamente, indicándonos que en esta orientación de perfil hay una coincidencia muy ajustada a las isolíneas de ondulación geoidal. Finalmente, el perfil 3, a lo largo de la bahía de Buenaventura en dirección este con una longitud de 40 kilómetros aproximadamente, mantiene la tendencia entre el MSL y los modelos geoidales a lo largo de su recorrido, mejorando su ajuste en el área portuaria de Buenaventura respecto a GEOCOL 2004; La variabilidad de separación elipsoide-*datums* para este perfil debido a su perpendicularidad con las isolíneas de ondulación geoidal es de unos 4 metros aproximadamente.

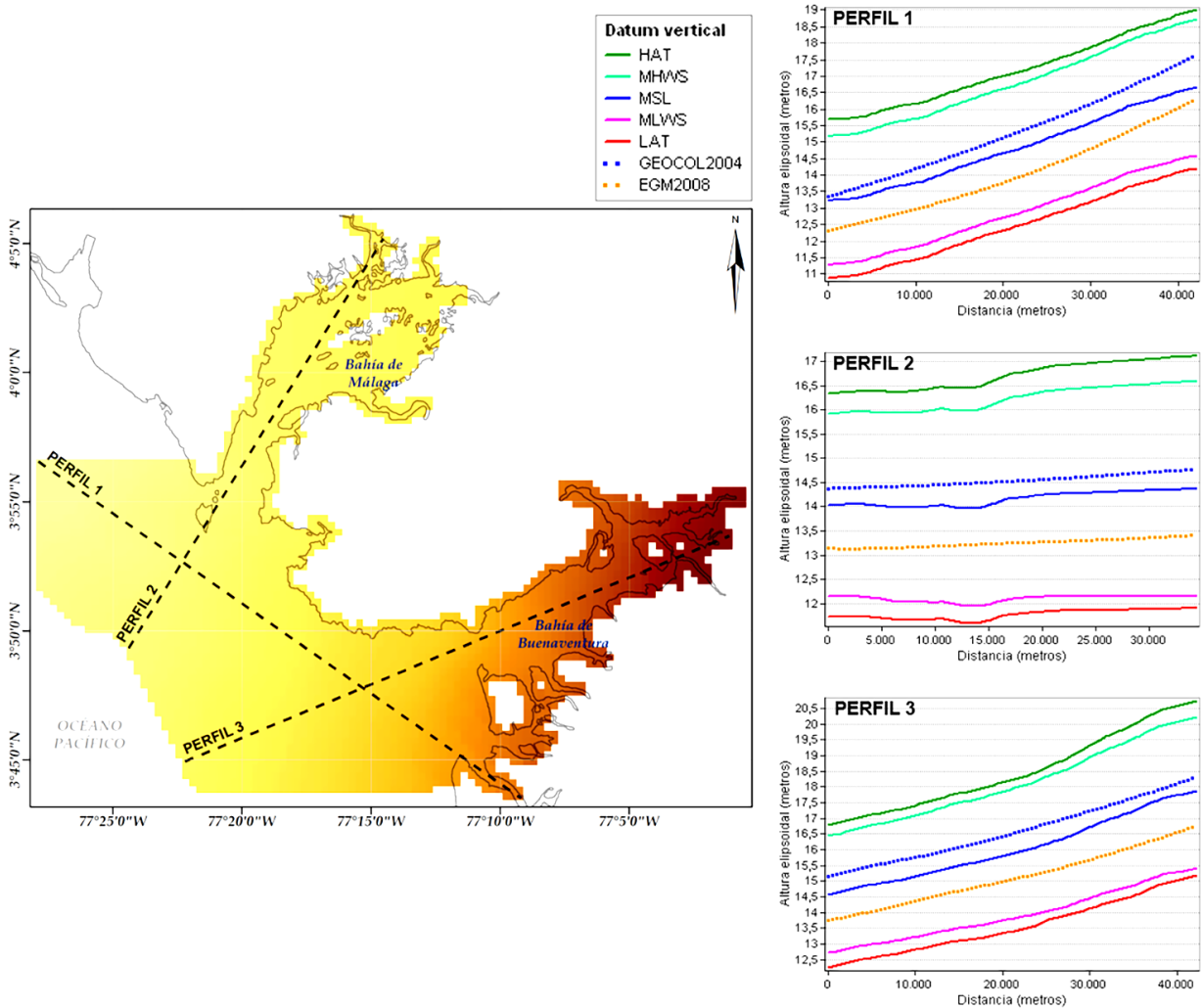


Figura 5. Variaciones de los *datum* en diferentes líneas de perfil.

Así, teniendo en cuenta que el componente horizontal de la SHRV maneja una resolución de 500 metros, la incertidumbre total combinada se determinó solamente en el componente vertical como variable crítica en el objeto y alcance de la superficie. Esta incertidumbre total en la vertical estuvo dada por la sumatoria de las incertidumbres aportadas por separado en los diferentes procesos técnicos llevados a cabo; la malla de levantamiento de alturas elipsoidales en la superficie del agua, la materialización de la red geodésica, y el control vertical mediante nivelación trigonométrica; estimándose un valor final de ± 6 cm.

DISCUSIÓN

El sistema oficial de alturas en Colombia permite con un grado de incertidumbre mínimo la realización de proyectos y actividades que involucran mediciones en tierra, haciéndolas compatibles entre sí gracias al soporte del marco geodésico de referencia nacional, el cual está definido por una red de marcas materializadas para el control vertical y horizontal, estaciones activas de observación GPS y el modelo geoidal GEOCOL 2004, siendo finalmente, el nivel medio del mar el plano de referencia vertical.

Ahora bien, el sistema actual de alturas se hace insuficiente cuando su uso es requerido en el desarrollo de actividades que involucran medición en cuerpos de agua influenciados por la dinámica de la marea, principalmente en levantamientos hidrográficos y sus actividades derivadas, donde se requiere que las profundidades sean referidas a un *datum* específico de nivel de agua, preferiblemente uno coincidente con niveles bajos de marea, como la más baja astronómica LAT o el promedio de bajamares bajas de sicigia MLWS, *datums* diferentes al nivel medio del mar sobre el cual se refiere el sistema oficial de alturas.

Paralelo a lo anterior en lugares con régimen macromareal como es el caso del Pacífico colombiano donde se presentan rangos de marea superiores a los 4 metros con variaciones del mismo debido a la morfología del fondo y del litoral, hacen impreciso asumir un único valor de *datum* para áreas consideradas como unidad de navegación completa, es el caso de la bahía de Buenaventura donde la diferencia en rango entre

el sector de la bahía externa y los complejos portuarios pueden llegar al orden de los 1.2 metros (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, 2016).

La incertidumbre generada al no contar con *datums* de nivel de agua determinados y densificados dentro de cada una de las bahías y puertos principales, asociados a un marco de referencia geodésico, desencadena inconsistencias en los datos hidrográficos finales producidos por distintas entidades. Así mismo, hace que la fusión con datos provenientes de levantamientos en tierra sea complicada y técnicamente se opte por hacer correcciones verticales arbitrarias a fin de lograr un correcto ajuste.

A nivel global este tipo de problemas e inconsistencias se han solventado gracias a la generación de modelos de separación entre elipsoide de referencia y *datum* de nivel de agua, los cuales abarcan un área geográfica marítima de interés y son construidos bajo la fusión de observación mareográfica permanente, generación de redes de control vertical con marcas fijas en tierra, observación GNSS permanente, altimetría satelital y boyas GNSS como es el caso del proyecto VORF (Iliffe, Ziebart y Turner, 2007) desarrollado en el Reino Unido.

La superficie Hidrográfica de Referencia Vertical SHRV2016 para las bahías de Buenaventura y Málaga a diferencia de VORF, fue construida mediante observación GNSS en modo RTK sobre la superficie del agua, pero manteniendo la determinación de *datums* de nivel de agua basada en la observación histórica y el análisis de la variabilidad de rango y fase presentes (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, 2016). La red de 11 vértices de control de alta precisión, materializados y distribuidos en tierra a lo largo del área de estudio, permitió efectuar la comprobación del modelo y sus valores, mediante el resultado de las nivelaciones de precisión realizadas desde cada punto al *datum* de interés.

La SHRV 2016 es compatible con el actual Marco Geodésico de Referencia Nacional y su correspondencia con el Marco Terrestre de Referencia Internacional, su aplicabilidad al igual

que VORF, estará en función de la estandarización, desarrollo de levantamientos hidrográficos optimizando tiempos y recursos al emplear métodos de corrección por marea utilizando equipos GNSS en modo RTK, las herramientas de predicción de mareas y la correcta fusión con datos provenientes de levantamientos en tierra.

CONCLUSIONES

- La SHR2016 se convierte en el primer modelo de separación entre el elipsoide y los diferentes *datums* hidrográficos de referencia verticales en Colombia, mediante una superficie de 500 metros de resolución espacial y una estimación de incertidumbre total en el componente vertical de ± 6 cm, garantizando el mejor ajuste a las condiciones mareográficas locales del área de estudio, lo cual beneficiará la calidad de las actividades que involucren mediciones referidas a un *datum* vertical en el agua, tales como dragados, levantamientos hidrográficos, generación de modelos de terreno con datos batimétricos y datos de tierra entre otros.
- El uso de receptores GNSS en modo RTK, se ha convertido en una herramienta cada vez más utilizada para la observación de alturas con alta precisión, su aplicación en la medición de puntos sobre la superficie de agua, permitió asociar los registros mareográficos y por consiguiente los *datum* verticales derivados de estos, con el elipsoide de referencia WGS84. Lo anterior plantea la posibilidad de poder crear estaciones mareográficas en locaciones mar adentro, aprovechando elementos flotantes como las boyas que señalizan el canal navegable de ingreso a la bahía, donde se puede instalar un receptor GNSS de funcionamiento permanente en modo de recepción de correcciones diferenciales RTK desde una base de referencia en tierra, obteniendo series de tiempo de nivel de agua referidas al elipsoide.
- La correlación del nivel MSL de la SHRV con los modelos geoidales EGM2008 y GEOCOL 2004 permitió identificar una tendencia muy coincidente en toda el área abarcada, donde las diferencias en los valores de separación u ondulación respecto al elipsoide se mantuvieron en el orden aproximado de los 0.5 metros respecto al GEOCOL 2004 y 1 metro respecto a EGM2008. Lo anterior plantea la posibilidad de poder hacer ajustes locales a los modelos geoidales mencionados gracias a variables que se han cuantificado localmente para el área de estudio, principalmente la variabilidad de rango y fase que presenta la marea, y es representada en los *datums* verticales definidos y amarrados elipsoidalmente.
- La SHRV permitirá efectuar levantamientos hidrográficos en el área de estudio aplicando el método de corrección de mareas en tiempo real con equipos GNSS, gracias al valor de separación *elipsoide-datum* entregado por la SHRV, despejando así la variable que haría falta conocer en un levantamiento hidrográfico, donde la antena del receptor GNSS se encarga de medir todos los movimientos en la vertical que sufra la embarcación. Esta metodología supone un ahorro significativo de tiempo, recursos e infraestructura que se demanda cuando las correcciones por nivel de agua se hacen en post proceso, acudiendo a los registros tomados de una o varias estaciones de observación mareográfica.
- El análisis de la consistencia entre las alturas elipsoidales de los *datum* de nivel de agua derivadas a partir de nivelación trigonométrica y las obtenidas del levantamiento GNSS RTK, provee un importante parámetro de redundancia y comprobación para asegurar la calidad de la información. En el área de las bahías estudiadas, la discrepancia promedio entre las dos alturas analizadas es de ± 5 cm, variando entre -6 cm y 9 cm.
- La construcción de la SHRV de manera local para las bahías de Buenaventura y Málaga y su replicamiento en los principales puertos del país, permitirá plantear el futuro desarrollo de un modelo total de separación *elipsoide-datums* que abarque el litoral Pacífico y Caribe, así como la región insular, extendiéndose hasta los límites marítimos, gracias a la inclusión de datos provenientes de altimetría satelital, boyas GPS y otros, migrando finalmente a la creación del marco oceánico de referencia vertical para Colombia.

- Con el propósito de optimizar año tras año la Superficie Hidrográfica de Referencia Vertical, deben hacerse actualizaciones a la red de marcas fijas en tierra, mediante nivelaciones de precisión, comprobación de coordenadas, aplicación de modelo de velocidades para correcciones por desplazamiento xyz, e incorporación de los ajustes realizados en el cálculo de datums verticales producto del aumento histórico de datos de nivel de agua.

REFERENCIAS

- Álvarez, O., Lincklinger, F., Weidmann, C., Ariza, J., Gim, M., Juan, S., Juan, S., Nacional, C. y Cient, I. (2016). Modelos globales de gravedad goce y egm2008: su utilidad y complementariedad en la exploración geofísica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 73(1), 134–148.
- Álvarez Machuca, M. C., Bermúdez Rivas, C. y Niño Pinzón, D. C. (2018). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca. 7-15.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico. (2016). Implementación de la Red Hidrográfica Nacional de referencia vertical para los puertos marítimos colombianos fase 1, 171.
- Davis, D., Nanlal, C., Sutherland, M. y Sutherland, M. (2011). Towards the Development of a Methodology for Vertical Separation Models in the Caribbean Towards the Development of a Methodology for Vertical Separation Models in the Caribbean, 18–22.
- DMA. (1988). World Geodetic System 1984: Parameters, formulas and graphics for the practical application of WGS-84. *Technical report, part two. Supplement to Department of Defense, DMA, Defense Mapping Agency.*, 601–610.
- Drewes, H. y Heidbach, O. (2009). The 2009 horizontal velocity field for South America and the Caribbean. *Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures*, 19.
- García, J. y Cuervo, E. (1978). Pronóstico de pleamares y bajamares en la costa occidental de Colombia para el año de 1978. (IGAC, Ed.). 23.
- IGAC. (1976). Nivelación geodésica, resultados definitivos: puntos y cotas. (IGAC, Ed.) (Vol. 2). 145.
- Illiffe, J. ., Ziebart, M. K., Turner, J. F., Oliveira, J. F. y Adams, R. (2006). The VORF project - Joining up Land and and Sea. *Hydro International*, (13), 24–26.
- Illiffe, J. C., Ziebart, M. K. y Turner, J. F. (2007). A New Methodology for Incorporating Tide Gauge Data in Sea Surface Topography Models. In *Marine Geodesy* (pp. 271–296). Taylor y Francis. doi:10.1080/01490410701568384
- Lemoine, F., Kenyon, S., Factor, J., Trimmer, R., Pavlis, N., Chinn, D., Cox, C., Klosko, S., Luthcke, S., Torrence, M., Wang, Y., Williamson, R., Pavlis, E., Rapp, R. y Olson, T. (1998). The Development of the joint NASA GSFC and NIMA Geopotential Model EGM96. Greenbelt, Md. : National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center. 575.
- Martin, R. J. y Broadbent, G. J. (2004). Chart datum for hydrography. *The Hydrographic Journal*, 112.
- Martínez, W., Flórez, J. y Sánchez, L. (1995). Determinación de nuevas estaciones absolutas de gravedad en Colombia, 3, 81–87.
- NOAA. (1988). Data Announcement 88-MGG-02, Digital relief of the Surface of the Earth. (NOAA, Ed.).
- NOAA. (2007). Introducción a las mareas oceánicas. (NOAA, Ed.). (COMET Prog.). 39.
- OHI. (2017). Adopción de la revisión propuesta de la resolución de la OHI No 3/1919 - Datums y marcas de nivelación. 10.
- Parker, B., Milbert, D., Hess, K. y Gill, S. (2003). National VDatum - The Implementation of a National Vertical Datum Transformation Database. *Sea Technology*, 44(9), 10–15.

Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C. y Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *J. Geophys. Res*, 117. doi:10.1029/2011JB008916

Sánchez, L. (2003). Determinación de la superficie vertical de referencia para Colombia. (DGK, Ed.). 106.

_____. (2009). Strategy to establish a global vertical reference system. In H. Drewes (Ed.), *Geodetic Reference Frames* (pp. 273–278). Munich, Germany: Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-00860-3_42

Sanchez, L. y Martínez, W. (2001). Improving the Quasigeoide model in Colombia. In H. Drewes, A. H. Dodson, L. P. S. Fortes, L. Sánchez, y P. Sandoval (Eds.), *Vertical Reference Systems* (pp. 152–156). Cartagena de Indias: Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-04683-8

_____. (2001). Approach to the new vertical reference system for Colombia. In H. Drewes, A. H. Dodson, L. P. S. Fortes, L. Sánchez, y P. Sandoval (Eds.), *Vertical Reference Systems* (pp. 27–33). Cartagena de Indias, Colombia: Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-04683-8