

Determinación de los datums de referencia vertical con fines hidrográficos para la Bahía de Cartagena

Vertical reference datums determination for hydrographic applications in Cartagena Bay

Fecha de recepción: 2013-08-15 / Fecha de aceptación: 2013-12-01

Diego Armando Pulido Nossa ¹, Armando de Lisa Bornachera ¹, Dagoberto David Viteri ¹, Richard Guzmán Martínez ¹.

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Barrio El Bosque, Isla de Manzanillo, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia. Tel: +57(5) 669 44 65. Correo electrónico: ¹ dpulido@dimar.mil.co, ² adelisa@dimar.mil.co, ³ ddavid@dimar.mil.co, ⁴ rguzman@dimar.mil.co.

Pulido, D.A., De Lisa, A., David, D. y Guzmán, R. 2013. Determinación de los datums de referencia vertical con fines hidrográficos para la Bahía de Cartagena. Bol. Cient. CIOH (31):175-190.

RESUMEN

El Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), en representación de la Dirección General Marítima (Dimar), autoridad marítima nacional, comprometida con los procesos de reglamentación y estandarización de las actividades que se realizan en la jurisdicción del puerto de Cartagena, especialmente los levantamientos de información batimétrica que se realizan en la Bahía de Cartagena, definió los datums o niveles de referencia vertical hidrográficos basándose en una metodología que combina la utilización de datos históricos, correspondientes al año 2011, de nivel de agua registrados por la estación mareográfica ubicada en el muelle del CIOH en la Bahía de Cartagena, cálculos matemáticos con los registros obtenidos y resultados de trabajos de campo, para relacionar la red geodésica nacional con los niveles verticales obtenidos. De esta forma se generó el metadato que permite referir un levantamiento hidrográfico a los niveles determinados acorde a la necesidad y/o propósito final del trabajo.

Los datums obtenidos fueron: MLWS (promedio de las bajamares de sicigia), utilizado para la referenciación de la cartografía náutica oficial colombiana; LAT (marea astronómica más baja) y MSL (nivel medio del mar). Todos los anteriores corresponden a datums recomendados por la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) para la referenciación vertical de levantamientos hidrográficos, especialmente el MLWS y el LAT. Adicionalmente se calcularon los datums MHWS (promedio de las pleamares de sicigia) y HAT (marea astronómica más alta). Además de los fines de generación cartográfica, los resultados obtenidos permitirán ampliar el rango de productos, análisis y estudios que se derivan del cálculo, implementación y estandarización de los niveles verticales, como es el caso de las fusiones con datos espaciales producto de levantamientos en tierra, utilización de la metodología para medición de ascensos y descensos del nivel de agua por medio de tecnología GNSS RTK; siendo ésta la de más alta precisión disponible en la actualidad en el desarrollo de levantamientos hidrográficos en el ámbito mundial, por parte de la Dimar, contar con el soporte técnico para exigir la estandarización a un mismo nivel de referencia vertical, de los levantamientos hidrográficos que realizan entidades externas generando un control eficiente que resolverá definitivamente discrepancias que se han presentado constantemente cuando se confrontan productos de distintas entidades.

PALABRAS CLAVES: datum vertical hidrográfico, estandarización, Bahía de Cartagena, mareas.

ABSTRACT

The Oceanographic and Hydrographic Research Center CIOH on behalf of the Maritime Authority DIMAR, committed to the process of regulation and standardization of the activities that take place in the jurisdiction of the Cartagena's port, especially bathymetric surveys carried out in the Bay, defined Datum or reference hydrographic vertical levels based on a methodology that combines the use of 2011 recorded water level data in the mareographic station located at the pier of CIOH in the Bay of Cartagena, mathematical calculations with the records obtained and fieldwork results to establish the relationship between national geodetic network and vertical levels obtained, so that in this way generate the metadata that allows refer hydrographic survey to the levels determined according to the needs and purpose work.

The Datum obtained were: MLWS (Mean Low Water Springs) used for referencing Colombian official nautical charting, LAT (Lowest Astronomical Tide) and MSL (mean sea level), all previous datums are recommended by the IHO (International Hydrographic Organization) for vertical referencing in hydrographic surveys especially MLWS and LAT. Also were calculated the MHWS (Mean High Water Springs) and HAT (Highest Astronomical Tide) datums. Additionally to the cartographic generation purposes, the results obtained will allow expand the range of products, analysis and derived studies from calculation, implementation and standardization of vertical levels such as of fusions with spatial data product of land surveying, use of the methodology for measuring rise and fall of water level through RTK GNSS technology being this one the highest accuracy available today in the development of hydrographic surveys, by the maritime authority have the support technical for require the standardization to same vertical reference level of hydrographic surveys development by external entities, generating a efficient control that finally will resolve discrepancies that have occurred constantly when confronted products of different entities.

KEY WORDS: hydrographic vertical datum, standardization, Cartagena's Bay, tides.

INTRODUCCIÓN

En Colombia no se evidenciaron registros que indiquen la determinación de los diversos datum de referencia vertical con fines hidrográficos para ser materializarlos y relacionados con las redes de control vertical y horizontal vigentes en la actualidad a nivel nacional. Por su parte, la única referencia vertical oficializada y vigente en el país corresponde al nivel medio del mar, el cual está generalizado a nivel nacional desde hace décadas con base en las observaciones efectuadas durante los períodos de enero de 1942 a diciembre de 1951, de enero a diciembre de 1955 y de enero de 1957 a agosto de 1959 en el mareógrafo del puerto de Buenaventura, punto de origen para la red de control vertical terrestre oficial extendida por todo el país por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [1].

Paralelamente a los trabajos del IGAC, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) tomó el liderazgo con el fin de iniciar estudios que permitieran efectuar pronósticos basados en los registros almacenados de ascenso y descenso del nivel de agua, tanto en Buenaventura como en otros puertos, llegando a generar el pronóstico anual de pleamares y bajamares (año 1988). Se resalta que en este documento utilizaron como datum de referencia vertical el MLWS. Basados en esta publicación tomada como fuente [2], el CIOH optó por utilizarla para la corrección por ascenso y descenso del nivel de agua y la reducción vertical final de las profundidades en sus levantamientos hidrográficos, por consiguiente la cartografía náutica oficial colombiana está oficializada bajo este datum vertical.

En la actualidad, los países miembros de la OHI desarrollan sus trabajos bajo los estándares y normas que esta institución emite. Una constante recomendación de esta organización en los últimos años, ha sido encomendar la continua tarea de observar y consolidar las bases de datos correspondientes a los ascensos y descensos de nivel de agua en todos los cuerpos afectados por estas variaciones, refiriendo estas observaciones a los datum oficiales de tierra, con el fin de generar la investigación y conocimiento necesario para el desarrollo de productos e implementación de metodologías que garanticen cada vez, mayor precisión y permitan entender de mejor manera el entorno.

Países desarrollados como Canadá y Estados Unidos han implementado redes mareo-

gráficas con una amplia densidad de estaciones de observación con las que han soportado la determinación local, regional y nacional de productos como: niveles de referencia vertical, modelos matemáticos de aplicación hidrográfica, desarrollo de cartografía náutica y terrestre, administración de las zonas costeras, apoyo a la oceanografía, meteorología, alerta y prevención de desastres entre otros [2].

Este artículo tiene como objetivo describir la metodología que se utilizó para la determinación de los datum de referencia vertical hidrográficos para la Bahía de Cartagena como puerto piloto.

ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Cartagena se encuentra en el departamento de Bolívar, ubicada a los 10°16'18" y 10°25'12" latitud Norte y entre los 75°34'50" y 75°30'34" longitud Oeste. Debido a su constante dinámica, con tendencia al crecimiento de las actividades marítimas y comerciales, por ser el principal puerto del Caribe colombiano, ha fomentado un aumento significativo en todas sus actividades conexas; lo cual trae como resultado el sostenimiento de su calidad como puerto competitivo para el comercio internacional, basado en una seguridad marítima y logística eficiente.

Dentro de todas estas actividades se encuentran los levantamientos hidrográficos que realiza principalmente Dimar-CIOH, con el fin de recolectar la información necesaria y de calidad, para mantener actualizados sus productos cartográficos acompañando una correcta gestión de la señalización marítima, que garantice la seguridad en la navegación dentro del puerto y una constante cuantificación y descripción de los cuerpos de agua.

A raíz del incremento de las labores de levantamientos hidrográficos en la Bahía de Cartagena, por parte del CIOH y de las empresas del sector privado y teniendo en cuenta que desde 2011 Dimar inició la reglamentación de las actividades concernientes a levantamientos batimétricos que se realizan en aguas jurisdiccionales de la nación por empresas del sector privado [3], se hace necesario contar con los elementos de juicio amparados en el ámbito técnico, que permitan una correcta ejecución de la supervisión, control y validación de los resultados obtenidos producto de trabajos hidrográficos por entidades externas.

Al no estar determinados en forma espacial los niveles de referencia vertical hidrográficos, se han presentado discrepancias en la información hidrográfica recolectada (refiriéndose principalmente a medición de la profundidad) de una entidad a otra, generando incertidumbres y desconfianza en el gremio marítimo que finalmente desemboca en la necesidad por parte de la Autoridad Marítima de dar solución a esta situación mediante la determinación técnica e implementación de los datums hidrográficos de referencia vertical.

METODOLOGÍA

En un levantamiento hidrográfico se deben relacionar todas las profundidades medidas,

sin importar el estado de la marea o el nivel del agua en el momento del sondeo con un plano común o datum. El datum utilizado para reconocer alturas o profundidades para aplicaciones marinas es un datum vertical llamado 'datum de nivel de agua'. Para los datums derivados de las mareas, la mayoría son calculados sobre o referenciados en períodos específicos de 19 años o épocas de datum de marea, entendiéndose éste último como el tiempo requerido de observación y análisis de la marea para determinar el datum [2, 4]. El nivel vertical al que los sondeos en un levantamiento en particular hacen referencia, es conocido como el 'datum de sondeo'. El datum al que las profundidades en una carta se refieren es conocido como el 'datum de carta' [4]. En Colombia el MLWS es usado para los sondeos y para el datum de las cartas náuticas oficiales (Figura 1).

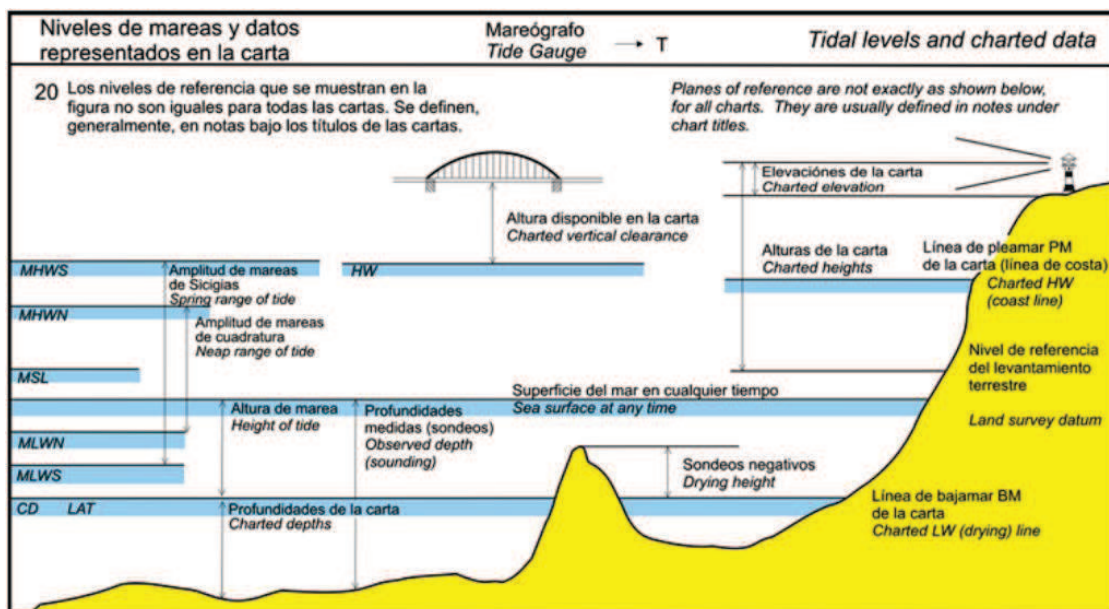


Figura 1. Diagrama de datums de referencia vertical tomado de carta INT 001.

El datum vertical usado para las observaciones de marea debe ser conectado con el datum general del levantamiento terrestre mediante marcas fijas prominentes en la vecindad de la regla/estación/observatorio de marea. Las determinaciones de la altura elipsoidal de las marcas de referencia verticales usadas para las observaciones de marea se deben hacer concernientes a un marco geocéntrico de referencia basado en el *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF, por sus siglas en inglés), preferible-

mente WGS84, o a un nivel de referencia geodésico apropiado [5].

El ITRF se caracteriza por contar con atributos tales como: tener alcance global, estar realizado con base en técnicas geodésicas espaciales y ser tridimensional y dinámico; esta última característica implica tener en cuenta la variable tiempo como la 'cuarta coordenada' (dicho en otras palabras, considerar que los puntos que materializan las redes se mueven por los efectos del movimiento

de la corteza terrestre). Por tanto, un ITRF estará asociado siempre a un espacio temporal determinado y de él, se desprenden marcos regionales como es el caso de SIRGAS para Suramérica y de éste también, se amarra una red a nivel local como lo es la red MAGNA Colombia. Actualmente se encuentra en vigencia el ITRF 2008 [6].

Para la determinación de los niveles de referencia vertical hidrográficos se utilizó como fuente principal los registros de ascenso y descenso de nivel de agua de 2011,

colectados por la estación mareográfica del Ideam, ubicada en el muelle del CIOH. Para el desarrollo del control vertical y horizontal necesarios se utilizaron los puntos geodésicos SIRGAS-CARTAGENA y CIOH 001 de la Red Geodésica Nacional, junto con la utilización de equipos como niveles topográficos de precisión y receptores GNSS RTK.

La Figura 2 ilustra las etapas de la metodología de trabajo adoptada para la consecución del objetivo final.

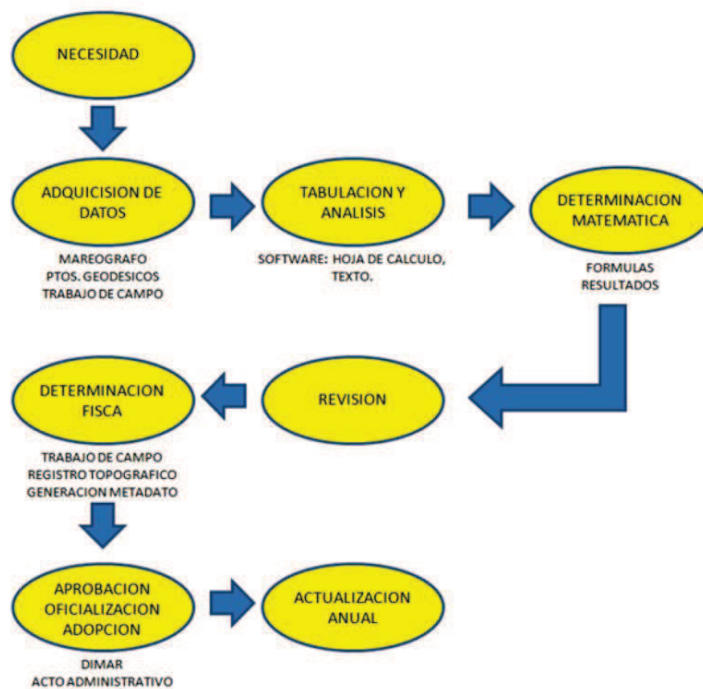


Figura 2. Diagrama de la metodología para la determinación de los datums de referencia vertical hidrográficos.

Adquisición

Esta etapa se inició efectuando un control vertical mediante una nivelación geométrica de precisión desde los puntos geodésicos SIRGAS-CARTAGENA de coordenadas geográficas 10°23'22,75"N y 75°31'54,3584", referidas al ITRF época 1995,4 el cual se tomó como principal siendo éste parte de la Red Geodésica Nacional y CIOH001 de coordenadas 10°23'28,005"N y 75°32'02,686"W como

punto secundario de apoyo hacia el cero de referencia de la estación mareográfica del Ideam, ubicada en el muelle del CIOH en la Isla de Manzanillo (Cartagena).

La finalidad de este procedimiento fue generar el registro y documentación de soporte para referir el cero del mareógrafo a la Red Geodésica Nacional, garantizando ajustes y reconstrucciones cuando sea necesario, sin perder la continuidad de los datos bajo un

mismo nivel de observación, evitando así traumatismos y pérdida de los datums a calcular. La cartera de nivelación generada será siempre el punto

de partida para chequeos de control de calidad y creación de una red vertical dentro del alcance geográfico de los niveles a calcular (Figura 3).

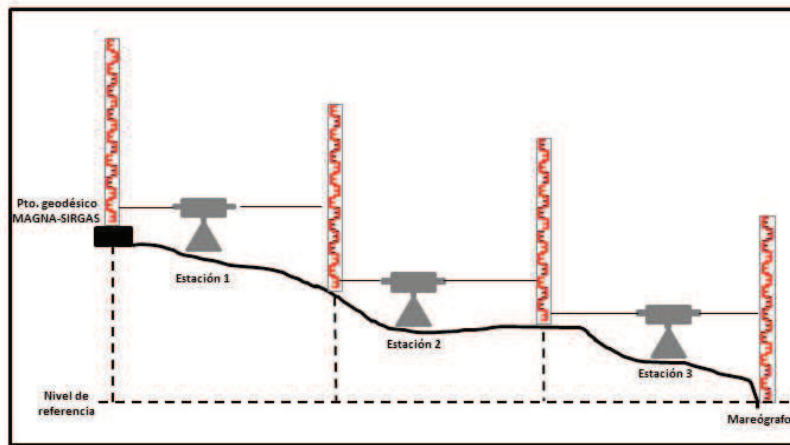


Figura 3. Esquema de nivelación geométrica.

Para garantizar que los datos arrojados por la estación mareográfica fueran apropiados en la determinación de unos datums verticales únicos para toda la bahía, teniendo en cuenta la extensión geográfica de la misma y no fuera necesario sectorizarla debido a diferencias marcadas de rango en el comportamiento mareal, entre puntos distantes, se procedió a instalar una estación mareográfica por espacio de 10 días en el muelle de embarcaciones menores del Fuerte San José, a los

$10^{\circ}18'50,4''N$ y $75^{\circ}34'39,6''W$, a una distancia aproximada de 10 km de la estación del CIOH (Figura 4). El resultado de la comparación entre los registros de las dos estaciones permite afirmar que el comportamiento de la onda de marea no presenta anomalías en cuanto a la similitud del rango (Figura 5), por tanto no es necesario sectorizar el área de estudio y los datums verticales que se obtendrán con la estación ubicada en el muelle del CIOH, aplicables para toda la Bahía de Cartagena.

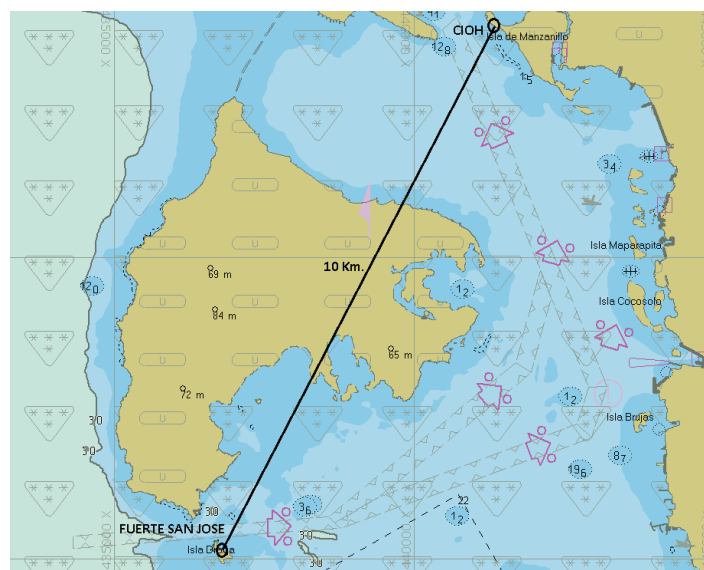


Figura 4. Localización estaciones de marea Fuerte de San José y CIOH.

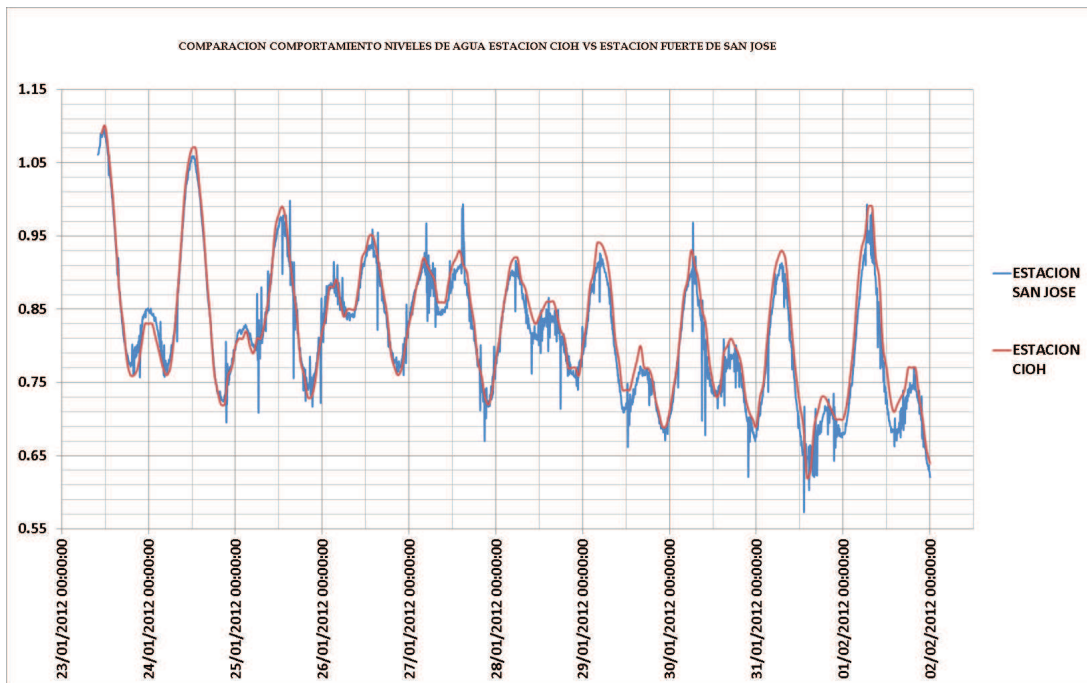


Figura 5. Comparación datos estaciones de marea Fuerte de San José y CIOH.

Los registros extraídos de la estación de marea ubicada en el muelle del CIOH corresponden a 2011 y se encuentran en intervalos de tiempo de una hora, iniciando el 01-01-2011 0000 horas y finalizando el 01-01-2012 0000 horas. Las alturas están expresadas en metros.

Análisis

La información recolectada durante 2011 fue analizada para identificar y eliminar saltos de información, datos fuera de rango por errores presentados en el sensor de medición; igualmente se organizaron los registros en forma mensual para su posterior manejo y cálculo de los datums. A lo largo de la serie de tiempo la única anomalía encontrada fue una pérdida de información en un espacio de 33 horas correspondiente al 0,37 % del total de registros, entre el 22-07-2011 22:00 horas hasta el 24-07-2011 08:00 horas.

RESULTADOS

Cálculo de los datums

Con la información debidamente tabulada se determinó cada uno de los datums de referencia vertical en la forma que se describe a continuación.

-MSL (Nivel Medio del Mar).

Para determinar el MSL se tuvieron en cuenta los registros tomados cada hora durante cada uno de los meses de 2011, con la finalidad de establecer el nivel medio mensual (Tabla I), posteriormente se promediaron los resultados obtenidos por mes con el fin de obtener el valor final, acuerdo a la siguiente fórmula [7]:

$$MSL(mensual) = \frac{\sum_{h=?}^{horas\ totales\ mes} m(h)}{horas\ totales\ mes} \quad (1)$$

Se procedió a calcular el valor anual:

$$MSL(anual) = \frac{\sum^{12} MSL(mensual)}{12} \quad (2)$$

$$MSL\ anual = \frac{\sum(0,28;0,26;0,29;0,34;0,36;0,39;0,36;0,44;0,41;0,46;0,47;0,43)}{12}$$

-MSL Anual.

Éste es el valor real del MSL que se adopta para la Bahía de Cartagena, representado en la regla de nivel ubicada en la estación mareográfica; en otros términos, el MSL para Cartagena se encuentra ubicado a 0,37 m, sobre el cero de referencia de la estación principal mareográfica ubicada en el muelle del CIOH.

-MLWS y MHWS.

Para la determinación del MLWS y el MHWS se agruparon independientemente cada mes las bajamares más bajas y las pleamares más altas en época de sicigia (figura 7) correspondientes a las fases lunares de Luna Llena y Luna Nueva (Tabla II a la XIII). Posteriormente, se promediaron con el fin de obtener el valor definitivo anual.

$$MLWS(mensual) = \frac{\sum(Ba)_m}{\text{Numero de bajamares}} \quad (3)$$

Donde, (Ba)_m es el valor de las bajamares seleccionadas.

$$MHWS(mensual) = \frac{\sum(Pa)_m}{\text{numero de pleamares}} \quad (4)$$

Donde, (Pa)_m es el valor de las pleamares seleccionadas.

Tabla I. Niveles medio del mar mensuales.

Mes	No. Registros	∑ registros (m)	Msl (m)
Enero	743	207,89	0,28
Febrero	672	177,68	0,26
Marzo	744	217,82	0,29
Abril	720	243,56	0,34
Mayo	744	268,86	0,36
Junio	720	284,57	0,40
Julio	711	255,02	0,36
Agosto	744	328,42	0,44
Septiembre	720	295,44	0,41
Octubre	744	344,05	0,46
Noviembre	720	341,12	0,47
Diciembre	745	320,77	0,43

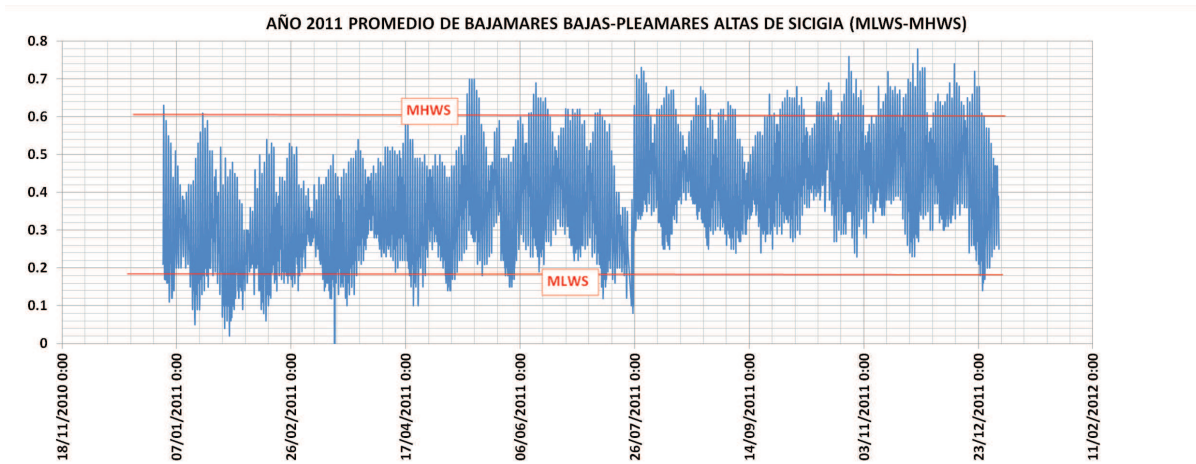


Figura 6. MSL año 2011.

ENERO-PROMEDIO DE LAS BAJAMARES BAJAS DE SICIGIA (mlws) Y PROMEDIO DE LAS PLEAMARES ALTAS DE SICIGIA (mhws)

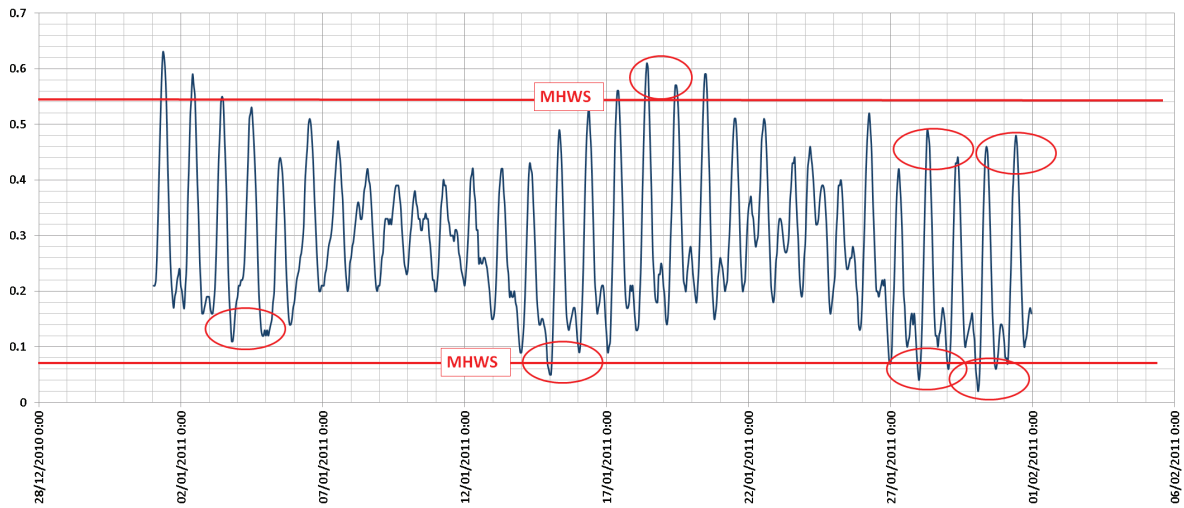


Figura 7. MLWS y MHWS enero

Enero:

Tabla II. Bajamares más bajas y pleamares más altas en sicigia en las fases lineales para el mes de Enero

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,11	0,02	0,63	0,48
0,12	0,06	0,59	0,46
0,05	0,04	0,61	0,44
0,09	0,07	0,57	0,49
0,0925	0,0475	0,60	0,4675
0,07		0,53375	

MLWS enero= 0,07 m MHWS enero= 0,53 m

Febrero:

Tabla III

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,09	0,16	0,45	0,49
0,12	0,18	0,44	0,52
0,06	0,15	0,54	0,5
0,08	0,16	0,53	0,52
0,0875	0,1625	0,49	0,5075
0,125		0,49875	

MLWS febrero= 0,12 m MHWS febrero= 0,5 m

Marzo:

Tabla IV

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,14	0,13	0,44	0,54
0,14	0,15	0,46	0,51
0,12	0,18	0,47	0,51
0,12	0,13	0,5	0,49
0,13	0,1475	0,4675	0,5125
0.13875		0.49	

MLWS marzo= 0,14 m MHWS marzo= 0,49 m

Abril:

Tabla V

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,19	0,15	0,52	0,53
0,18	0,1	0,54	0,58
0,15	0,15	0,49	0,58
0,1	0,18	0,49	0,54
0,155	0,145	0,516	0,5575
0,15		0,53375	

MLWS abril= 0,15 m MHWS abril= 0,53 m

Mayo:

Tabla VI

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,14	0,18	0,66	0,58
0,14	0,22	0,7	0,49
0,18	0,22	0,7	0,49
0,17	0,21	0,7	0,49
0,1575	0,2075	0,69	0,5125
0,1825		0,60125	

MLWS mayo= 0,18 m MHWS mayo= 0,6 m

Junio:

Tabla VII

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,15	0,19	0,66	0,61
0,15	0,21	0,69	0,59
0,17	0,22	0,65	0,62
0,23	0,23	0,65	0,62
0,175	0,2125	0,6625	0,61
0,19375		0,63625	

MLWS junio= 0,19 m

MHWS junio= 0,64 m

Julio:

Tabla VIII

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,12	0,08	0,62	0,63
0,15	0,1	0,61	0,71
0,15	0,3	0,62	0,72
0,19	0,33	0,61	0,73
0,1525	0,2025	0,615	0,6975
0,1775		0,65625	

MLWS julio= 0,18 m

MHWS julio= 0,66 m

Agosto:

Tabla IX

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,25	0,25	0,68	0,68
0,25	0,31	0,65	0,67
0,27	0,32	0,66	0,62
0,26	0,3	0,67	0,63
0,2575	0,295	0,665	0,65
0,27625		0,6575	

MLWS agosto= 0,28 m

MHWS agosto= 0,6 6m

Septiembre:

Tabla X

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,24	0,27	0,62	0,67
0,25	0,29	0,62	0,65
0,25	0,29	0,59	0,64
0,26	0,32	0,64	0,62
0,25	0,2925	0,6175	0,645
0,27125		0,63125	

MLWS septiembre= 0,27 m MHWS septiembre= 0,63 m

Octubre:

Tabla XI

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,27	0,23	0,65	0,66
0,29	0,28	0,65	0,7
0,28	0,29	0,65	0,76
0,3	0,35	0,68	0,66
0,285	0,2875	0,6575	0,695
0,28625		0,67625	

MLWS octubre= 0,29 m MHWS octubre= 0,68 m

Noviembre:

Tabla XII

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,33	0,29	0,67	0,78
0,29	0,28	0,63	0,72
0,28	0,23	0,74	0,68
0,31	0,23	0,70	0,69
0,3025	0,2575	0,685	0,7175
0,28		0,70125	

MLWS noviembre= 0,28 m MHWS noviembre= 0,70 m

Diciembre:

Tabla XIII

Sicigia			
Luna Llena	Luna Nueva	Luna Llena	Luna Nueva
Bajamares	Bajamares	Pleamares	Pleamares
0,33	0,22	0,64	0,72
0,32	0,21	0,66	0,68
0,31	0,14	0,69	0,61
0,3	0,18	0,74	0,6
0,315	0,1875	0,6825	0,6525
0,25125		0,6675	

MLWS diciembre= 0,25 m

MHWS diciembre= 0,67 m

A continuación se calculó el valor definitivo para el MLWS y MHWS basado en el promedio mensual:

$$MLWS (anual) = \frac{\sum MLWS (mensual)}{12} \quad (5)$$

$$MLWS\ anual = 0,2$$

$$MHWS (anual) = \frac{\sum MLWS(mensual)}{12} \quad (6)$$

$$MHWS\ anual = \frac{(0,07; 0,12; 0,14; 0,15; 0,18; 0,28; 0,27; 0,29; 0,28; 0,25)}{12}$$

$$MHWS\ anual = 0,61$$

El valor de MLWS de 0.2 m es el valor definitivo a adoptar para la Bahía de Cartagena, que será ajustable anualmente hasta completar la edad de la marea (19 años), tomando como referencia el nivel cero de la estación mareográfica ubicada en el muelle del CIOH; así mismo será el plano vertical estándar para la reducción de sondajes que serán empleados como fuente en la producción de cartografía náutica oficial y demás levantamientos hidrográficos cuyo propósito no esté orientado a un proyecto o estudio que requiera de otro nivel de reducción.

-El valor de MHWS Anual (0,61 m)

Valor definitivo adoptado para este nivel de referencia en la Bahía de Cartagena, ajustable anualmente hasta completar la edad de la marea (figura 8).

-HAT y LAT

El cálculo de estos dos datums de referencia se tomó de manera provisional, correspondiendo a la pleamar más alta y la bajamar más baja presentada en el periodo de un año, debido a que es estrictamente necesario completar 19 años de registros para garantizar la veracidad de estos niveles.

-HAT (0,78 m)

Valor de pleamar más alto en la serie de tiempo, registrado el 26 de noviembre de 2011.

-LAT (0,02 m)

Valor de bajamar más bajo en la serie de tiempo, registrado el 30 de enero de 2011.

Con el fin de generar el metadato oficial de los niveles calculados, se procedió a efectuar una nivelación geométrica de precisión [8] para conocer la cota de altura elipsoidal del cero en la estación mareográfica. La nivelación parte desde el punto geodésico SIRGAS-CARTAGENA de coordenadas y altura elipsoidal conocida, hacia el cero de la estación mareográfica.

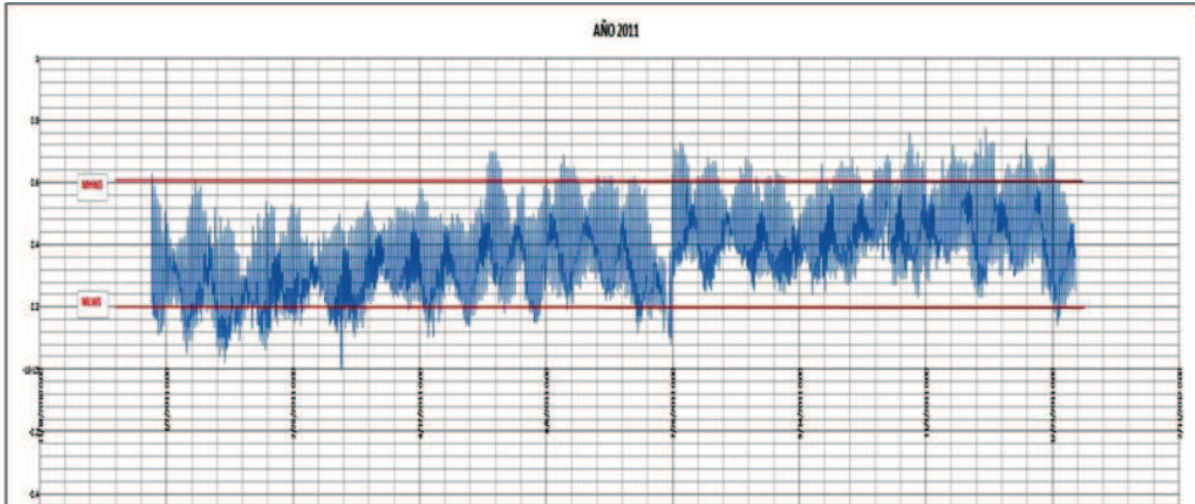


Figura 8. MLWS y MHWS año 2011.

La Figura 9 representa la ubicación de los niveles de referencia vertical para la Bahía de Cartagena, basado en el cero de referencia de la estación mareográfica principal.

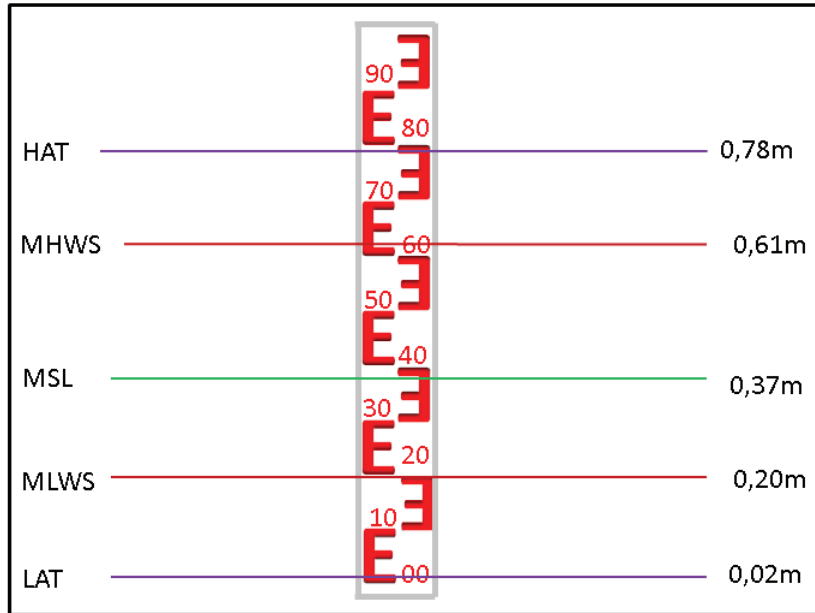


Figura 9. Representación de los datums de referencia vertical hidrográficos para la Bahía de Cartagena, calculados con relación al cero de la estación mareográfica del CIOH.

Para el cálculo final de alturas de los datums se asume que el cero del mareógrafo y el punto geodésico de referencia SIRGAS-CARTAGENA están en el mismo eje vertical, teniendo en cuenta que la distancia que los separa en el plano horizontal es de aproximadamente 170 m, espacio en el cual la separación vertical entre el elipsoide y el plano horizontal sufre cambios despreciables para

esta investigación. Se procedió a efectuar una sumatoria aritmética tomando como punto de partida el cero del mareógrafo en términos de altura elipsoidal con cada uno de los datums calculados, obteniendo así las cotas de altura elipsoidal para cada uno de estos. Los resultados de la nivelación quedaron consignados en la cartera correspondiente (Tabla XIV) y las alturas elipsoidales finales de los datums verticales se aprecian en la Tabla XV.

Tabla XIV. Cartera de nivelación geométrica compuesta.

COSTA SIRGAS CARTAGENA -4,46															
VAT	Promedio	HS:HI	Diferencia	PTO OBSER	VAD	Promedio	HS:HI	Diferencia	PTO OBSER	DIST.SEG	DIF.NIVEL	COTA	Corrección	Corrdifniv	Cota Corregida
0.96 0.96 0.96	0.9600	1.13 0.787	0.343	Punto SIRGAS-CARTAGENA	1.42 1.42 1.42	1.4200	1.625 1.214	0.411	Orilla carretera pista DDHH	75.4	-0.4600	-4.9200	0.0007	-0.4607	-4.9207
1.648 1.648 1.649	1.6483	1.841 1.454	0.387	Orilla carretera pista DDHH	1.053 1.054 1.053	1.0533	1.239 0.87	0.369	Palmeras detrás del CIOH	75.6	0.5950	-4.3250	0.0007	0.5943	-4.3264
1.302 1.302 1.302	1.3020	1.447 1.159	0.288	Palmeras detrás del CIOH	2.868 2.869 2.868	2.8683	3.108 2.628	0.48	Muelle CIOH cero mareografo	76.8	-1.5663	-5.8913	0.0007	-1.5671	-5.8935
VAT	Promedio	HS:HI	Diferencia	PTO obser	VAD	Promedio	HS:HI	Diferencia	PTO Obser	Dist. Seg	Dif.Nivel	Cota	Corrección	Corrdifniv	Cota corregida
2.848 2.849 2.848	2.8483	3.079 2.617	0.4617	Muelle CIOH cero mareografo	1.66 1.66 1.66	1.6600	1.92 1.401	0.519	Esquina pista derechos humanos	98.07	1.1883	-4.7030	0.0009	1.1874	-4.7061
1.356 1.357 1.357	1.3567	1.562 1.15	0.412	Esquina pista derechos humanos	1.435 1.435 1.436	1.4353	1.59 1.28	0.519	Casa 3 pista derechos humanos	72.2	-0.0787	-4.7817	0.0007	-0.0793	-4.7854
1.286 1.286 1.286	1.280	1.417 1.156	0.261	Casa 3 pista de derechos humanos	0.96 0.96 0.96	0.9600	1.13 0.787	0.343	Punto SIRGAS-CARTAGENA	60.4	0.3260	-4.4557	0.0006	0.3254	-4.4600
DIST.TOTAL REC		458.47		ERROR PERMISIBLE		5.416833		Error de cierre				0,0043			
		FACTOR DE CORRECCIÓN		9.452E-06				Error de cierre 4mm, la nivelación es aceptada							

Tabla XV. Referenciación de alturas al cero del mareógrafo y al elipsoide WGS-84 en metros.

	Bajamares	Bajamares	Pleamares
SIRGAS			
Cartagena	1.4335		-4.4600
Cero mareógrafo	0.0000		-5.8935
MSL	0.3700		-5.5235
MLWS	0.2000		-5.6935
MHWS	0.6100		-5.2835
LAT	0.0200		-5.8735
HAT	0.7800		-5.1135

CONCLUSIONES

Los datums verticales obtenidos representan un estándar que permitirá a la Dimar estar en la capacidad de brindar la herramienta técnica definitiva para resolver las discrepancias que se generaban entre productos hidrográficos de diferentes instituciones cuando no se tenía la certeza del nivel al que se referían sus mediciones. Los niveles que se calcularon y todos los ajustes que deban sufrir a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta que fueron calculados con datos de un año, dependerán del mantenimiento y correcto funcionamiento de las estaciones mareográficas.

Además de las aplicaciones en levantamientos hidrográficos, los datums servirán como fuente de comparación y ajuste de manera local en estudios que ya se han desarrollado en anteriores investigaciones y proyectos, como es el caso de la determinación de líneas de jurisdicción, modelos de inundación, pronósticos de mareas, etc.. Los niveles verticales hacen parte del soporte técnico principal

para la delimitación de límites y fronteras marítimas teniendo en cuenta las modificaciones que pueden sufrir elementos como la línea de base recta al incluir o no características que emergen sobre la superficie del agua, dependiendo del datum de marea con el que se tuvieron en cuenta al momento de diseñar la misma [9].

Para lograr una eficiente y práctica utilización de los datums es necesario extender los mismos, utilizando técnicas de nivelación de precisión a distintos lugares dentro de la Bahía de Cartagena, partiendo de la estación principal, monumentando vértices de control que contendrán las diferencias de altura entre los distintos datums y su respectiva separación al elipsoide de referencia (N) (Figura 10), con el fin de densificar la red y brindar la opción, tanto a usuarios internos como externos, de iniciar sus trabajos y proyectos en cualquier punto de la bahía sin tener que efectuar traslado de alturas desde el punto geodésico principal (SIRGAS-Cartagena) hasta su lugar de interés.

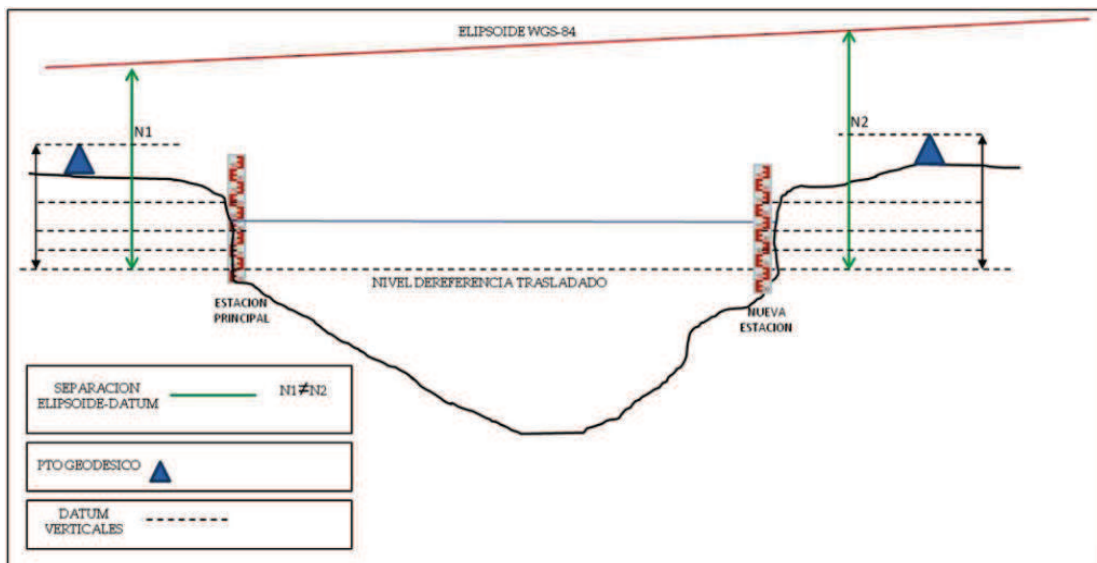


Figura 10. Traslado de niveles verticales y cálculo de nueva separación elipsoide-datum.

La creación de estas nuevas estaciones de control que contienen la variable N (separación elipsoide-datum) fomentará la futura implementación de un modelo matemático conocido como la superficie de referencia vertical hidrográfica [10], la cual tendrá una resolución dependiente del número de mediciones 'N' con las que se cuente teniendo

en cuenta la distribución espacial de las mismas, siendo definida finalmente, por la interpolación de una nube de puntos x, y, N . Esta superficie vertical permitirá el desarrollo de metodologías de trabajo modernas en los levantamientos hidrográficos como es el caso de la medición del nivel de agua mediante el método de mareas RTK con equipos GPS de

alta precisión. Esta técnica, además de aportar una menor incertidumbre en la observación de la marea durante la toma de datos de profundidad, permite ahorrar tiempo y reduce la utilización de equipos, pues ya no se hace necesaria la instalación de mareógrafos y reglas para corregir esta variable.

La cuantificación de los datums verticales diversifica las posibilidades de productos finales, ya que permite obtener sondajes reducidos a distintos niveles acorde a los requerimientos que se tengan. La densificación de vértices geodésicos que contengan la separación datum vertical-elipsoide facilita la integración de la batimetría a datos de tierra provenientes de levantamientos con alturas elipsoidales como el caso de LiDAR, garantizando la generación de modelos de elevación tierra-fondo marino de mayor confiabilidad, que servirán como una fuente en estudios orientados a la determinación de áreas de riesgo por fenómenos naturales, jurisdicción de la autoridad marítima, simulaciones y modelos para eventos catastróficos, entre otros.

La metodología planteada en este documento para la determinación de los datums de referencia vertical hidrográfica puede ser verificada tomando como referencia estudios realizados por entidades como la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos [2], donde los niveles verticales han generado la implementación de diversos modelos matemáticos de referencia como es el caso del programa VDatum. Otro ejemplo a resaltar es el de la Oficina Hidrográfica del Reino Unido (UKHO, por sus siglas en inglés), donde se desarrolló el Vertical Offshore Reference Frame (VORF, por sus siglas en inglés) [11], tomando como punto de partida los datums verticales que calcularon producto de sus registros históricos de nivel de agua en distintos lugares de su geografía.

Se recomienda que Dimar extienda este proyecto a todos sus puertos principales, iniciando con la implementación de una red mareográfica con capacidad operativa constante que permita obtener en el lapso de un año, los datos necesarios para cuantificar los niveles de referencia vertical con una incertidumbre aceptable, la cual se irá ajustando hasta completar el ciclo de 19 años para los valores del HAT y LAT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Untersuchung physikalischer höhen in kolumbien, Laura Sánchez, studienarbeit. 2002. Institute fur planetare geodäsie technische universität dresden, november.
- [2] National Oceanic and Atmospheric Administration. 2000. Tidal Datums and Their Applications. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 1.
- [3] Dimar. Resolución 157 de 2011.
- [4] OHI. 2005. Manual de Hidrografía Publicación C-13. Mónaco. 1 Ed. Capítulo 4, p. 273.
- [5] OHI. 2008. Normas de la OHI para levantamientos hidrográficos. 5 Ed., p.11.
- [6] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2004. Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia. Pp. 11-12.
- [7] Pons Valls, J. 2009. Universidad Politécnica de Cataluña. La medición del mar: principios y métodos. Mapping No.135 2009, pp. 6-10.
- [8] Cárdenas, A., Bohórquez, N., Nieto, A., Fonseca, D. y Arias, J. 2011. Manual de Geodesia para Hidrografía. Dimar-CIOH, pp. 98-101.
- [9] (FIG) International Federation of Surveyors. 2006. Guide on the Development of a Vertical Reference Surface for Hydrography, Publication No. 37.
- [10] Márques, N. 2000. The Importance of the Tidal Datum in the Definition of Maritime Limits and Boundaries. Maritime Briefing Vol.2, No. 7 University of Durham.
- [11] Turner, J.F., Iliffe, J.C. & Ziebart, M.K. 2009. Interpolation of Tidal Levels in the Coastal Zone for the Creation of a Hydrographic Datum.