

**APLICACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA OBTENER UN MODELO  
BATIMÉTRICO EN AGUAS SOMERAS MEDIANTE EL EMPLEO DE IMÁGENES  
SATELITALES.**

**Application of a procedure to obtain a bathymetric model in shallow waters by means of the  
employment of satellites images.**

*MSc. Armando Díaz Rodríguez<sup>1</sup>*

*Dr. C Alberto Rodríguez Anaya<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Academia Naval “Granma” Orden “Antonio Maceo”, Cuba, armando.drodriguez@nauta.cu, Academia de las FAR General “Máximo Gómez Báez” Habana del Este.

<sup>2</sup> UCT GEOCUBA IC, albertoanayacuba67@gmail.com, [anaya@uct.geocuba.cu](mailto:anaya@uct.geocuba.cu), Loma y 39, Nuevo Vedado, Plaza de la Revolución

## **RESUMEN**

La plataforma marina cubana se extiende sobre una superficie de 70 000 Km<sup>2</sup>, rodeada de numerosos cayos y cayuelos, donde un porcentaje significativo lo conforman zonas de bajas profundidades (0,5 – 8 m) y alta transparencia en la columna de agua, lo que posibilitan el empleo de la Percepción Remota (PR) en la determinación de las profundidades marinas en aguas someras.

En el presente trabajo se expone cómo obtener un modelo batimétrico en aguas someras, a partir del empleo de la Percepción Remota. Para ello se tuvo en cuenta el método propuesto por “IHOIOC GEBCO Cook Book”, y sobre la base de este, se diseñó un procedimiento para generar un modelo batimétrico en 3D a partir de imágenes de satélites, al que se le agregaron una serie de subprocesos útiles para la mejoría del resultado final. El procedimiento garantiza un ahorro considerable de tiempo, recursos humanos y financieros. Se utilizó como zona experimental para validar la propuesta el “Rincón de Guanabo” enclavado en la zona costera al este de la capital. La imagen empleada fue RapidEyes con 5 m de resolución espacial, obteniéndose un modelo batimétrico con un EMC de  $\pm 46,9$  cm, el cual está dentro del valor permisible para la incertidumbre vertical máxima en los levantamientos batimétricos de Orden 1<sup>a</sup>. El resultado obtenido es satisfactorio para ejecutar los levantamientos batimétricos con fines medioambientales, y puede ser empleado además como herramienta alternativa que le permita a los hidrógrafos tener una información preliminar de una zona de estudio.

**Palabras Clave:** Percepción Remota, batimetría, RapidEyes.

Recibido :09/01/2023

Aprobado: 08/05/2023

## **ABSTRACT**

The Cuban marine platform extends over an area of 70,000 km<sup>2</sup>, surrounded by numerous keys, where a significant percentage is made up of areas of low depth (0.5 – 8 m) and high transparency in the water column, which enable the use of Remote Sensing (PR) in the determination of sea depths in shallow waters.

This paper presents how to obtain a bathymetric model in shallow waters, from the use of Remote Sensing. For this, the method proposed by "IHO-IOC GEBCO Cook Book" was taken into account, and based on this, a procedure was designed to generate a 3D bathymetric model from satellite images, to which a series of useful subprocesses were added for the improvement of the final result. The procedure guarantees considerable savings in time, human and financial resources. The "Rincón de Guanabo" located in the coastal area east of the capital was used as an experimental zone to validate the proposal. The image used was RapidEyes with 5 m of spatial resolution, obtaining a bathymetric model with an EMC of  $\pm 46.9$  cm, which is within the permissible value for the maximum vertical uncertainty in the bathymetric surveys of Order 1a. It allows saving time, human and financial resources. It was used as an experimental area to validate this proposal Rincon de Guanabo. The image used was RapidEyes with 5 m spatial resolution, where it is obtained the bathymetric model EMC  $\pm 46.9$  cm, which is within the maximum allowable vertical uncertainty bathymetric surveys Order 1<sup>a</sup>.

The result obtained is to satisfactory to perform bathymetric surveys for environmental purposes, or use the proposed alternative tool which allows hydrographer to have a preliminary information from a study area procedure.

**KeyWords:** Remote Sensing, bathymetry, RapidEyes.

## **I. INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo tiene como objetivo elaborar un modelo batimétrico en aguas someras a partir del empleo de la Percepción Remota, mediante la aplicación de un procedimiento. En el mismo se exponen brevemente los métodos y tecnologías más empleadas en Cuba y el mundo, que relacionan el uso de la Percepción Remota en la determinación de las profundidades. Además, se expone un procedimiento creado sobre la base del método publicado por "IHO-IOC GEBCO Cook Book", que permitió ahorrar tiempo, recursos humanos y financieros, empleando para ello una imagen RapidEyes con una resolución espacial de 5 m. El algoritmo matemático utilizado para el cálculo de las profundidades marinas es el de Stump. Para la elaboración del modelo se tuvo en cuenta la corrección por marea y el resultado obtenido se comparó con los datos archivados de un levantamiento batimétrico, realizado en una zona de estudio por métodos convencionales, arrojando resultados satisfactorios, los que posibilitan a los hidrógrafos tener una información preliminar de un área de estudios.

## **II. METODOLOGÍA**

En la presente investigación se emplearon imágenes satelitales del sensor RapidEyes a 5 m de resolución espacial. También se emplearon para contrastar los resultados de la propuesta, la DATA de un levantamiento realizado por métodos convencionales (hidroacústicos).

Para la determinación de las profundidades en el océano se ha empleado fundamentalmente el método hidroacústico, utilizando ecosondas del tipo haces simples o single beam (SBES) y de haces

múltiples o multibeam (MBES). Por este método se realizan la mayor parte de los levantamientos batimétricos, permitiendo medir con precisión las profundidades marinas.

Es reconocido internacionalmente que, además de los métodos antes mencionados, se emplean otros complementarios como los Batímetros Láser o sistemas LIDAR, y otros que fundamentalmente emplean imágenes aéreas y satelitales para realizar el cartografiado del fondo y distintos estudios en el entorno marino. También se han generado diferentes algoritmos matemáticos, los cuales han arrojado resultados satisfactorios.

En Cuba se emplearon algunos de estos métodos en los diferentes experimentos que se realizaron en la plataforma marina, siendo el fotodensitométrico el más empleado.

### **II.1 Métodos empleados para la determinación de las profundidades en el medio marino.**

A diferencia de los métodos tradicionales (hidroacústicos), aquellos que emplean imágenes aéreas y satelitales deben tener en cuenta factores como: la transparencia del agua, el carácter del fondo, el estado de la superficie del mar, el grado de turbidez de la masa de agua, la nubosidad, y la altura del Sol sobre el horizonte. Estos son:

- Método Fotodensitométrico. □ Método Fotogramétrico o estereofotogramétrico.
- Profundidad relativa (*Relative Water Depth*)
- Batimetría derivada de satélite método publicado en IHO-IOC GEBCO Cook Book

#### **Método Fotodensitométrico**

La esencia del Método Fotodensitométrico de determinación de las profundidades del mar en aguas someras, que se desarrolló en la década de los años ochenta y principio de los noventa en el entonces Instituto Cubano de Hidrografía (ICH), se basaba en la posibilidad de relacionar matemáticamente la Densidad Óptica ( $D$ ) de un punto dado de la imagen fotográfica (positivo original), en la que se ha registrado un sector de la plataforma marina, y la profundidad ( $Z$ ) de este punto.

$$Z = F(D) \quad (1)$$

O sea, las profundidades son función de las densidades ópticas registradas en el negativo aerofotográfico. La función  $F$  es una variable muy compleja. Este método contiene 4 variantes, las cuales se derivan de la fórmula general (1).

Por sencilla que parezca esta fórmula, es más complicada de lo que aparenta, puesto que la profundidad ( $Z$ ) de un punto variará en dependencia de la reflectancia del fondo marino registrada por la cámara aerofotográfica y, por tanto, de la magnitud de la densidad óptica ( $D$ ): a mayor profundidad, en el positivo fotográfico las densidades serán mayores. **Método Fotogramétrico o estereofotogramétrico**

El método fotogramétrico está basado en la correlación matemática entre las coordenadas de los puntos del terreno y las imágenes de los mismos en el par fotográfico, utilizando los equipos estereofotogramétricos, que pueden ser análogos o estaciones fotogramétricas digitales, como el Photomod. Para ello se supone que en el lecho marino hay una cantidad de contornos que son identificables en la fotografía, permitiéndonos obtener el modelo estereoscópico. Se plantea en la literatura consultada que este método, en dependencia de la transparencia de las aguas, es aplicable en el rango de las profundidades entre 5-20 metros.

O sea, a diferencia del método Fotodensitométrico, el Estereofotogramétrico necesita que existan contornos identificables en el fondo marino.

No existe información acerca de la exactitud del método estereofotogramétrico de determinación de las profundidades marinas.

De acuerdo a información verbal, el método fotodensitométrico que se empleó en las investigaciones realizadas en el ICH, arrojó que la determinación de profundidades de la plataforma marina se comportó en los experimentos realizados con un error medio cuadrático de  $\pm 0,3\text{m}$ , comprobado con los levantamientos acústicos llevados a cabo en la zona experimental. **Profundidad relativa (*Relative Water Depth*)**

Esta es una herramienta que posee el programa ENVI encargada de determinar la profundidad relativa del medio marino, la misma se incorporó a partir de su versión 5.0. Teóricamente es capaz de cubrir profundidades entre los 20-25 metros en condiciones ideales de transparencia de las aguas. Existen sensores como el RapidEyes que pueden ser capaces de penetrar hasta los 18 m y 34 m de profundidad con la banda del verde y azul respectivamente.

### **Batimetría derivada de satélite método publicado en IHO-IOC GEBCO Cook Book.**

La Batimetría Derivada de Satélite (BDS) es un procedimiento muy útil que puede ser usado para crear mapas batimétricos en aguas someras, determinar los tipos de fondos, identificar la vegetación marina, extraer la línea de costa y determinar las crestas arrecifales. Está considerado como una herramienta de reconocimiento útil para obtener mapas batimétricos de aguas someras, permitiendo caracterizar la configuración del fondo marino y sus ecosistemas. Pueden realizarse batimetrías con imágenes obtenidas de varias plataformas satelitales comerciales multiespectrales, tales como: *IKONOS*, *WORLDVIEW*, *SPOT* y *QUICKBIRD* entre otros. No obstante, existen imágenes gratuitas, obtenidas por otras plataformas como: *LANDSAT 7*, *LANDSAT 8* y *SENTINEL*, que pueden emplearse también para determinar las profundidades marinas. Existe un procedimiento creado para determinar profundidades con imágenes *LANDSAT 7* y *8* que utilizan la banda verde, azul y la del infrarrojo cercano, para el cual se han obtenido resultados satisfactorios.

### **II.2 Procedimiento para obtener modelos batimétricos en aguas someras de la plataforma marina mediante la percepción remota.**

Este autor asimiló durante su investigación el método propuesto por “IHO-IOC GEBCO Cook Book”, y sobre la base de este, diseñó un procedimiento para generar modelos batimétricos en 3D a partir de imágenes de satélites, agregándole al anterior una serie de subprocesos, útiles para la mejoría del resultado final. La BDS mediante la PR mejorará considerablemente en función de la resolución espectral, temporal y espacial de la imagen a utilizar. Para un mejor entendimiento del mismo se realizó el siguiente esquema tecnológico.



Figura 1. Esquema tecnológico de la propuesta

La imagen a utilizar debe tener un fragmento de la costa, además se debe obtener en horas tempranas en la mañana para evitar el efecto brillo o reflejo del Sol sobre la superficie del mar, así como la presencia de nubes. Por otra parte, se debe recopilar toda la información posible de la zona de estudio y la misma se puede extraer de las cartas náuticas, mapas topográficos a diferentes escalas e imágenes aéreas y satelitales. **II.3 Algoritmo matemático**

Para el desarrollo del procedimiento este autor se acogió al modelo matemático desarrollado por Stump:

$$z = m_1 \left( \frac{\ln(nRw(\lambda_i))}{\ln(nRw(\lambda_j))} \right) - m_0$$

Donde:

$z$  - Profundidad a determinar  $m_1$

- Valor de Ganancia o Sesgo

$m_0$  - Compensación

$\lambda_i$  - Banda Azul  $\lambda_j$  -

Banda Verde

La exactitud en la determinación de las profundidades se puede ver afectada en zonas donde existe vegetación o bien se hallan diferentes tipos de fondo, para lo cual sería necesario realizar correcciones por el tipo de fondo y por la vegetación.

Las Normas de la OHI para los Levantamientos Hidrográficos, Publicación Especial S-44, constituyen una serie de estándares desarrollados por la Organización Hidrográfica Internacional, para ayudar a mejorar la seguridad a la navegación. En la misma se establece la clasificación de los levantamientos hidrográficos, así como la incertidumbre en la determinación de las profundidades y el posicionamiento. La misma se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\pm\sqrt{a^2 + (b * d)^2}$$

Donde:

a - Representa la porción de la incertidumbre que no varía con la profundidad. b - Es un coeficiente que representa la porción de la incertidumbre que varía con la profundidad.

c - Es la profundidad

Tabla 1. Calculo de la incertidumbre vertical

No.	Clasf. del levantamiento	A	b	d (m)	Incertidumbre vertical
1	Orden Especial	0.25	0,0075	1	0,25 m
2	Orden 1ª	0.5	0.013	1	0,50 m

### III RESULTADOS

#### Situación Geográfica y aspectos generales de la zona.

El Rincón de Guanabo se encuentra enmarcado en la provincia de La Habana, en el municipio Habana del Este. Es un tramo de playa comprendido en las Playas del Este que se extienden 5 mn desde la desembocadura del Rio Tarará hasta la boca del Rio de Guanabo. Comprende de forma sucesiva las playas Bacuranao, Tarará, El Mégano, Santa María del Mar, Boca Ciega, Guanabo, La Veneciana, Brisas del Mar y El Rincón. Enclavada en la ensenada Sabarimar en las afueras del poblado Guanabo. La zona de estudio está ubicada específicamente entre los 23°10'16" y los 23°11'16" de latitud norte y los 82°5'45,30" y 82°7'44,7" de longitud oeste. Ocupa una superficie de aproximadamente 6 Km². Limita al Norte con el estrecho de la Florida, al Sur con el poblado de Campo Florido, al Oeste con playa La Veneciana y al Este con Punta Indio.



Fig 1: Ubicación Geográfica

La zona de los trabajos presenta una costa profusamente urbanizada. Está caracterizada por bajos a menos de 5 m de profundidad y la presencia de cabezos. Específicamente existe un bajo costero de arena, y en parte rocoso, a menos de 10 m de profundidad, bordea la costa en toda su extensión con amplitud mínima en el extremo W, y máxima de 1,4 M a la altura de playa Guanabo; este bajo costero es acantilado y presenta algunos cabezos y rocas aisladas a menos profundidad, peligrosos para la navegación, como los del bajo Jaruco y el bajo Lavanderas, situados al NW y al ENE de la

desembocadura del río Guanabo, respectivamente; más allá del veril acantilado del bajo costero las profundidades aumentan de forma abrupta y la navegación puede realizarse sin peligro alguno.

Al norte de la costa, a unos 600 m aproximadamente, se pueden encontrar numerosos cabezos de los cuales algunos velan, los que representan peligros para la navegación. La zona es de veril acantilado y alcanza 200 m de profundidad a poco más de 1 km de la costa.

### II.5 Adquisición de los datos.

La imagen que se utilizó para la generación de la Batimetría Derivada de Satélite fue RapidEyes. La misma fue adquirida de forma gratuita, pero no es de los programas espaciales que brindan este servicio entre los que se destacan: LANDSAT y SENTINEL. El costo de esta imagen por Km<sup>2</sup> asciende a los 30 USD. En la **Tabla 1** se muestran los principales datos de la imagen.

Tabla 2. Parámetros de la imagen RapidEyes

No.	Parámetros	Datos
1	Fecha de obtención	2014
2	Resolución espacial	5 metros
3	<u>Datum</u>	<u>Nad 27</u> Cuba Norte
4	Proyección cartográfica	Cónica Conforme de Lambert
5	Cantidad de bandas	Infrarroja, Azul, Verde y Roja
6	Coste de la imagen por Km <sup>2</sup>	Alrededor 30 USD

### III. DISCUSIÓN

Se elaboró un modelo en 3D, generado a partir de los datos obtenidos en el levantamiento batimétrico realizado por métodos convencionales, el cual será utilizado para comprobar el modelo que se confeccionará a partir de las imágenes de satélites.

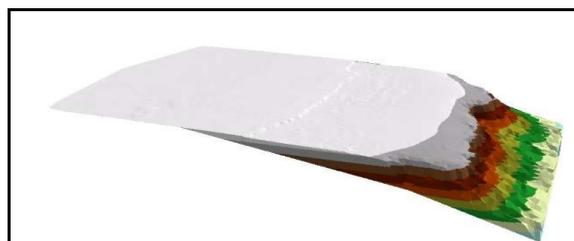


Fig. 2: Modelo batimétrico obtenido por métodos convencionales.

Por medio de este algoritmo se obtienen valores de profundidad en metros. Como se puede apreciar en la **Fig. 3** para un valor de reflectancia (1.058742) en la capa activada en la BDS en metros le corresponde uno de profundidad (4.146286), una vez introducidos en el algoritmo el valor de ganancia y compensación.

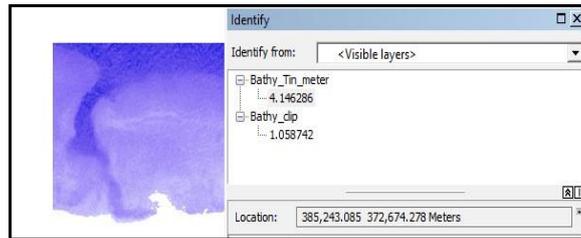


Fig. 3 Modelo batimétrico.

Se obtuvo el modelo batimétrico 3D de la zona de los trabajos, mediante una Malla de Triángulos Irregulares (TIN por sus siglas en inglés)

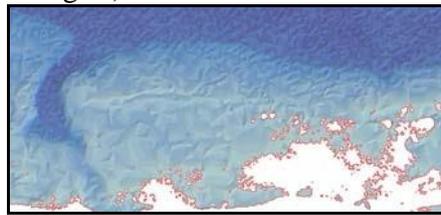


Fig. 4: Modelo batimétrico BDS (TIN)

La **Fig. 4** muestra una captura en pantalla del modelo 3D elaborado mediante la PR. Como se aprecia existen zonas en blanco. Esto puede ocurrir en zonas muy poco profundas (inferior a 0.5 m), puesto que los haces de luz al penetrar la columna de agua pueden generar un proceso llamado Sunlight en el cual el mismo rebota varias veces antes de ser captado por el sensor, o bien puede ser por la falta de información en el momento de la generación del modelo. Por otra parte, también puede ocurrir este fenómeno en zonas donde hay rocas que velan, lo que permite generar mapas de las crestas arrecifales o rocas que velan.

### III.1 Evaluación de la exactitud del modelo obtenido mediante la BDS.

Para la evaluación de la exactitud del modelo generado se superpuso el sondeo realizado por métodos convencionales al obtenido mediante la BDS. Luego se escogieron 10 puntos distribuidos homogéneamente por el modelo. A los mismos se le calculó el Error Medio Cuadrático (EMC) en la determinación de las profundidades.

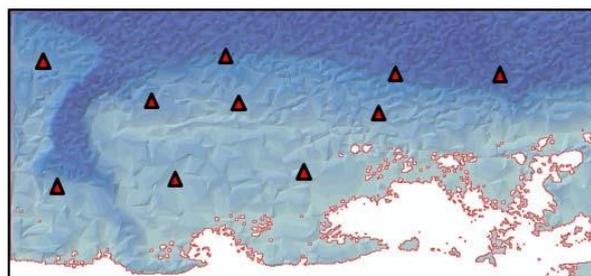


Fig. 4. Distribución de los puntos de control.

Luego para el mismo punto escogido, tanto en el modelo obtenido por métodos convencionales como por el de la propuesta, se extrajo el valor de la profundidad del mismo y se registraron en la siguiente tabla:

Tabla 2. Evaluación de la exactitud del modelo

No	X	Y	Z <sub>B</sub>	Z <sub>M</sub>	Z <sub>B</sub> -Z <sub>M</sub>	ΔZ <sup>2</sup>
1	386805.373	372576.496	2.000	2.110	-0.110	0.012
2	385895.913	372588.557	3.800	4.200	-0.400	0.160
3	385855.707	72463.919	3.600	3.890	-0.290	0.084
4	385936.119	372323.198	2.800	2.880	-0.080	0.006
5	385142.453	372592.578	4.600	4.490	0.110	0.012
6	385186.680	373207.729	15.600	15.132	0.468	0.219
7	384929.361	373018.761	16.700	16.200	0.500	0.250
8	385763.636	373215.771	10.400	11.140	-0.740	0.548
9	385212.814	373111.235	9.600	10.260	-0.660	0.436
10	384621.786	373360.512	8.800	9.500	-0.700	0.490

Donde:

X, Y - Coordenadas planas rectangulares

Z<sub>B</sub> - Profundidad determinada por el sondeo

Z<sub>M</sub> - Profundidad determinada por la BDS

El EMC en la determinación de las profundidades en la zona de los trabajos fue de  $\pm 46,9$  cm.

$$EMC = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta Z^2}{n}}$$

Donde:

n - cantidad de muestras.

ΔZ- Diferencia de profundidad.

Haciendo un análisis a Priori, se puede afirmar que la incertidumbre vertical máxima esperada para 1 m de profundidad en el Orden Especial es de 0.25 m y el EMC obtenido en la determinación de los puntos de control es de  $\pm 46,9$  cm, por tanto, no satisface las exigencias que demanda este tipo de levantamiento. Sin embargo, para la misma profundidad la incertidumbre máxima esperada para los levantamientos hidrográficos de Orden 1<sup>a</sup> es de 0.50 m, para la cual el EMC calculado está dentro del permisible. El mismo puede variar en dependencia de las imágenes a utilizar, puesto que mientras mayor sea la resolución espectral, espacial y temporal de la imagen, mejor se ajustará el modelo obtenido. **III.2 Comparación entre la BDS y sondeo batimétrico.**

Estableciendo una comparación entre los modelos obtenidos, teniendo en cuenta los recursos humanos y financieros que se necesitan para llevarlos a cabo, la siguiente tabla expone:

Tabla 3. Comparación entre la BDS y el levantamiento batimétrico

No	Denominación	BDS	Sondeo
1.	Cantidad de personal	1 persona	4 personas
2.	Duración de los trabajos (Días)	1	30
3.	Equipamiento	Laptop o PC	Laptop, PC, Mareógrafo, Ecosonda y Embarcación

4.	Software de procesamiento	ArcGIS y Excel	CARIS, Excel, AutoCAD y SURFER
5.	Coste económico total	47 209.15 CUP	187 226.49 CUP

En la comparación del factor tiempo se tuvo en cuenta la duración de los trabajos de campo y gabinete en ambos casos. La BDS depende de la resolución temporal de la imagen a utilizar. En la propuesta, la imagen utilizada ya estaba en poder del ejecutor, es por ello que la misma se obtuvo en un solo día. El levantamiento batimétrico ya sea en trabajos de campo, como de gabinete demoró 30 días.

### III.3 Evaluación económica de la efectividad de la aplicación del procedimiento propuesto.

En el mercado internacional los equipamientos necesarios para realizar los levantamientos batimétricos son elevados, además muchos de ellos deben ser comprados a terceros países, como resultado del bloqueo impuesto a Cuba por los Estados Unidos. Es por ello que se puede afirmar que la aplicación de este algoritmo representará un ahorro considerable para el país, teniendo en cuenta que para llevar a cabo el mismo, se pueden adquirir imágenes de satélites que están en la Web de forma gratuita.

En caso de que se empleen imágenes comerciales, como la RapidEyes, el costo de la misma es de 30 USD por Km<sup>2</sup>.

El costo del levantamiento batimétrico realizado en la zona por métodos convencionales asciende a \$187 226.49 CUP y en el caso de la propuesta es de \$47 209.15 CUP, lo que representa un ahorro de un 74.78%.

## IV CONCLUSIONES.

1. Se elaboró un procedimiento para obtener un modelo batimétrico en aguas someras de la plataforma marina mediante el empleo de la Percepción Remota y el uso de otras tecnologías que conforman la Geomática, lo que permite el ahorro de tiempo, recursos humanos y financieros.
2. El EMC en la determinación de las profundidades en el modelo obtenido mediante la BDS es de + 46,9 cm, estando este valor dentro de la incertidumbre máxima permitida para levantamientos batimétricos de Orden 1<sup>a</sup>, siendo el mismo satisfactorio para los levantamientos batimétricos en interés de los estudios medioambientales.
3. El procedimiento propuesto no tuvo en cuenta la corrección por tipo de fondo y vegetación.

## V. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Álvarez Portal, R. (1988). Investigación de las Metodologías de Percepción Remota para los estudios y la cartografía hidrográfica de las zonas costeras y de la plataforma marina.
2. Álvarez Portal, R. (2016). Elaboración de la metodología, el algoritmo y el programa computacional para el desarrollo experimental del método fotodensitométrico de determinación de profundidades en aguas someras de la plataforma marina: 1-30.

3. Álvarez Portal, R. (2016). Aplicaciones de las cámaras fotográficas aéreas en los estudios de la plataforma marina y zonas costeras; uso de otros sensores de percepción remota: 1-401.
4. Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de la Teledetección espacial.
5. IHO (2014). The IHO-IOC GEBCO Cook Book.
6. Internacional, B. H. (2005). Manual de Hidrografía. Mónaco