



Modelación numérica para la determinación de la cota máxima de inundación, en la Ensenada de Utría desde Playa de Diego hasta Ciudad El Valle-Chocó

Numerical modeling for the determination of the maximum flood elevation in La Ensenada de Utría, from Playa de Diego to Ciudad El Valle-Chocó

Camacho-De Angulo Yineth Viviana

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico

Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Narino, Colombia

Correo: yinethviviana@unicauca.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-0148-6976>

Oviedo-Barrero Fernando

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico

Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Narino, Colombia

Correo: feroba1978@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5559-1504>

Resumen

Este estudio aborda el cálculo del régimen medio y cota máxima de inundación en condiciones normales en la ensenada de Utría-Chocó, mediante la integración de información batimétrica y línea de costa, y teniendo en cuenta los cambios geomorfológicos representativos que convergen en las dinámicas costeras. Con este fin, se utilizó el modelo hidrodinámico H2D para simular y analizar 19 años de mar. Como resultado se obtuvieron los armónicos de marea para siete mareógrafos sintéticos ubicados a lo largo de la zona de estudio, con profundidades inferiores a 15 m; los cuales fueron insumos para el cálculo del régimen medio y las cotas máximas de inundación. El modelo H2D se calibró y validó con un R^2 0.9879 para el mareógrafo ubicado en Bahía Solano (06.2328 N, 77.4109 W). Se generaron los valores de régimen medio y la cota máxima de inundación mostrando una cota máxima promedio de 4.3075 m.s.n.m, información de importancia para realizar el trazado de jurisdicción en la zona, y permitiendo que la Dirección General Marítima ejerza con propiedad el control de los bienes de uso público.

Descriptores: Análisis armónico, cota de inundación, datum, marea, modelación numérica, nivel del mar, régimen medio.

Abstract

This study aims to calculate the mean regime and maximum flood elevation, under normal conditions, in La Ensenada de Utría-Chocó, integrating bathymetric and coastline information, and the representative geomorphological changes that converge in coastal dynamics. For this purpose, the H2D hydrodynamic model was used to simulate and analyze 19 tidal years. As a result, tidal harmonics were obtained for seven synthetic tide nodes, located along the study area, with depths less than 15 m, which were inputs for the calculation of the mean regime and maximum flood elevations. The H2D model was calibrated and validated with a R^2 0.9879 for the tide gauge located in Bahía Solano (06.2328 N, 77.4109 W). The values of mean regime and maximum flood elevation were generated, showing an average maximum elevation of 4.3075 m.a.s.l., this information is important to Dirección General Marítima makes the jurisdiction layout allowing the exercise with property control of public use goods.

Keywords: Datum, flood elevation, harmonic analysis, mean regime, numerical modeling, tide.

INTRODUCCIÓN

Las interacciones gravitatorias generan fuerzas de atracción que son mayores en los puntos más cercanos a los centros de masa y menores en los más alejados. Considerando la Tierra, como una esfera sin continentes y rodeada totalmente de agua, estas fuerzas transforman la masa de agua en un elipsoide, cuyo eje mayor siempre se dirige al cuerpo más cercano (Instituto Geográfico Nacional, 2021). Las mareas principalmente son generadas por la fuerza de atracción que la Luna ejerce sobre la Tierra, generando que el agua se acumule en el punto en que está bajo la Luna y en el lado opuesto de la Tierra. Estos abultamientos en el mar van, aparentemente, viajando alrededor de la tierra, de tal forma que determinan las pleamares por los sitios por donde van pasando, al igual que las olas, las mareas son oscilaciones periódicas del nivel del mar, pero de período muchísimo mayor (Pugh & Woodworth, 2014; Rangel & Montealegre, 2003). Por ello, los rangos y periodos de marea se ven afectados por la posición que en cada momento tengan el Sol, la Luna y la Tierra en los movimientos de sus respectivas órbitas. Así mismo existen otros factores locales de acuerdo con la localización geográfica que pueden afectar su comportamiento, como la línea de costa del área, su distribución geográfica, la topografía local, la profundidad de las cuencas oceánicas, las influencias hidrológicas y meteorológicas, entre otras, las cuales cumplen un rol importante en su comportamiento (Calero *et al.*, 2006).

En consideración con estos factores astronómicos y propios de las condiciones geográficas de la Tierra, nos enfrentamos a mareas determinísticas por un comportamiento astronómico, por considerar las atracciones gravitatorias que se generan del Sol y la Luna sobre los mares y océanos, causando la elevación de corrientes horizontales; esto se evidencia en el ascenso y descenso del nivel del agua (Fernández, 2011). A su vez, se entiende que los demás planetas del sistema solar ejercen atracción sobre estos cuerpos de agua, pero es mínima como para considerarla respecto a la ejercida por la Luna y el Sol. Evitando contar con éstas dentro de su estudio, se puede decir que la Teoría de equilibrio de Newton es una simplificación que resulta muy útil para comprender el funcionamiento de las mareas, suponiendo dos hipótesis: La Tierra completamente cubierta de H₂O, no existe fricción con el fondo (Fernández, 2011; Universidad de Las Palmas, 2013).

En estas condiciones, si se deja transcurrir el tiempo suficiente, se llega a una situación de equilibrio y la superficie del mar adopta la forma de un elipsoide (de marea) (COMET, 2007). Este movimiento de elevación y declinación se genera por la fuerza de atracción que

ejerce la Luna y el Sol sobre la Tierra, con periodos de 12 o 24 horas aproximadamente, debido a que la Luna gira alrededor del centro de masas común del sistema Tierra-Luna en un periodo de 28 días (IDEAM, 2016).

Otro de los factores que influye en la amplitud de estos cuerpos de agua es el tiempo atmosférico, que aporta de manera variable al comportamiento de la altura en la columna de agua; estas se conocen como mareas meteorológicas, las cuales se definen como la respuesta del nivel del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento y los campos de presiones. Esta se puede representar a través del residuo meteorológico que se obtiene tras la realización del análisis armónico a una serie de nivel del mar, dicho residuo tiene carácter aleatorio y su régimen medio sigue una distribución aproximadamente normal (GIOC, 2002).

La determinación periódica del nivel medio del mar permite dimensionar impactos socioeconómicos y ambientales que se puedan presentar en ecosistemas y sistemas productivos ubicados en las zonas costeras, y con ello, generar un plan de acción que permita disminuir la vulnerabilidad ante estos cambios (Jigena, 2015; Taylor *et al.*, 2019). A su vez, conocer este comportamiento en un lugar determinado es de gran importancia para el diseño y construcción de obras marítimas en el manejo integrado de zonas costeras y en la seguridad marítima (Blanco *et al.*, 2014; Cea *et al.*, 2017).

Colombia, por su ubicación geográfica al noroccidente de Sur América, y bajo una condición limítrofe con sus países vecinos, cuenta con dos costas sobre el océano Atlántico y Pacífico, respectivamente, cada una de ellas aporta condiciones de marea totalmente distintas, incidiendo en la dinámica ecosistémica y socioeconómica del país.

En el Caribe colombiano la marea es mixta diurna, es decir, que se presenta una pleamar (elevación) y una bajamar (descenso) durante un día, y mixta semidiurna cuando se presentan dos pleamares y dos bajamares (uno más alto y más bajo que el otro) durante un día. Estos patrones se presentan con cierta irregularidad y con valores submétricas (Andrade, 2003; CIOH-Cardique, 1998; Kjerfve, 1981). Por otro lado, la cuenca Pacífica colombiana se caracteriza por presentar una marea semidiurna, es decir, que se presentan dos mareas altas (pleamares) y dos bajas (bajamares) durante un día lunar (24 h 50 min), de manera que su periodo sea igual a la mitad (12 h 25 min). Como consecuencia, las alturas de las mareas altas y bajas consecutivas presentan poca discrepancia, en consideración a la superposición que la semidiurna ejerce sobre la marea diurna, con un comportamiento macromareal (IDEAM, 2010).

En Colombia, la Dirección General Marítima-DI-MAR ha avanzado en la instalación de estaciones me-

teorológicas automáticas en los principales puertos y en algunas zonas de interés del Pacífico y Caribe colombiano, con el fin de generar investigación científica marina, la generación de pronósticos meteomarineros, el estudio del nivel del mar, y demás investigaciones que se deriven de la oceanografía y la hidrografía.

Una de las principales aplicaciones de los insumos mareográficos obtenidos por DIMAR se centra en la delimitación de los bienes de uso público dentro del territorio, para establecer su jurisdicción en las costas (Ministerio de Defensa, 1984); pero aún se cuenta con amplias zonas en donde no hay presencia de estas estaciones ni se tienen registros históricos, por lo que, por medio de modelación numérica de nivel del mar y el estudio de este, como un proceso que involucra variables determinísticas y estocásticas es posible obtener series simuladas con el fin de determinar las cotas máximas de inundación en un punto de interés (GIOC, 2001, 2002; Otero, 2005b; Sánchez, 2008).

Como parte del contexto dentro de este tipo de estudios se han encontrado trabajos enfocados a la determinación de las cotas máximas de inundación, mediante modelación numérica, tales como: "Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas (bahías, estuarios, etcétera) cuando no se tienen registros instrumentales" (Otero, 2005b), "Determinación de la cota máxima de inundación en la frontera colombo-ecuatorial aplicando modelación numérica" (Vásquez *et al.*, 2018b), "Determinación de las cotas máximas de inundación, mediante modelación numérica, en Bahía Solano Chocó" (Vásquez *et al.*, 2018a) y otros de gran interés como: "Aplicación de un modelo hidrodinámico bidimensional para describir las corrientes y la propagación de la onda de marea en la Bahía de Buenaventura" (Otero, 2005a), y "Determinación de la línea de más alta marea para el litoral pacífico colombiano, aplicando métodos de modelación numérica. (Informe técnico)" (Sánchez, 2008).

De este modo se prioriza el modelo hidrodinámico H2D basado en ecuaciones de ondas largas, con el fin de determinar la marea astronómica y la marea meteorológica y, teniendo en cuenta el valor del efecto del run-up (acción de oleaje en costa) para así poder obtener la cota máxima de inundación en un punto determinado. En este sentido, este estudio cobra relevancia al aportar conocimiento sobre la dinámica del océano y de las zonas costeras del pacífico colombiano, permitiendo la determinación de la cota máxima de inundación, lo cual constituye un insumo de relevancia científica para elaborar la línea de más alta marea en una de las principales zonas de conservación y reserva del litoral Pacífico colombiano; siendo esta, una herramienta que permitirá a DIMAR realizar el trazado de jurisdicción, ejer-

ciendo con propiedad el control de los bienes de uso público, así como la elaboración de mapas de riesgo para mitigar efectos de inundación por situaciones extremas de sobre elevación del nivel del mar.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

La ensenada de Utría se ubica en el Pacífico colombiano, abarcando parte del litoral costero del departamento del Chocó, en jurisdicción de los municipios de Bahía Solano, Bojayá, Alto Baudó y Nuquí. Se encuentra a 05°53' y 6°11' de latitud Norte y entre 77°9' y 77°24' al Oeste. La zona de estudio limita al norte desde la ciudad del Valle con la playa Cuevita, al sur con la playa de Diego, al este con los departamentos de Bojayá y Alto Baudó, y al oeste con el Océano Pacífico, como se muestra en la Figura 1. Se extiende aproximadamente 100 km de longitud de línea de costa con presencia de diferentes playas, como Punta Diego, Playa San Pichi y Punta Brava (Banco de Occidente, 2002; Organización Colparques, 1996).

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de selvas húmedas de piso cálido que llegan hasta casi la orilla del mar, posee siete especies de manglares y un frente con acantilados rocosos cubiertos de selva que alcanzan alturas hasta de 1400 m.s.n.m. Tiene una pluviosidad de 10000 mm anuales, por lo que es considerada como una de las más lluviosas del mundo (Banco de Occidente, 2007, 2009).

MODELO HIDRODINÁMICO H2D

El modelo hidrodinámico se puede resolver mediante las ecuaciones de ondas largas, donde la hipótesis inicial es que la longitud de onda estudiada es mucho mayor que la profundidad sobre la que se propaga la misma ($L \gg h$), esta condición se puede considerar aplicable desde que $L < 20h$ (Pedlosky, 1987). El flujo es, fundamentalmente horizontal y las componentes horizontales de velocidad u y v son mucho mayores que la componente vertical w ; afirmaciones generalmente válidas, excepto en áreas locales con pendiente del fondo muy pronunciadas ($> 1/5$) ó en áreas en donde se producen fenómenos de afloramientos/hundimientos, o frentes oceánicos (GIOC, 2001).

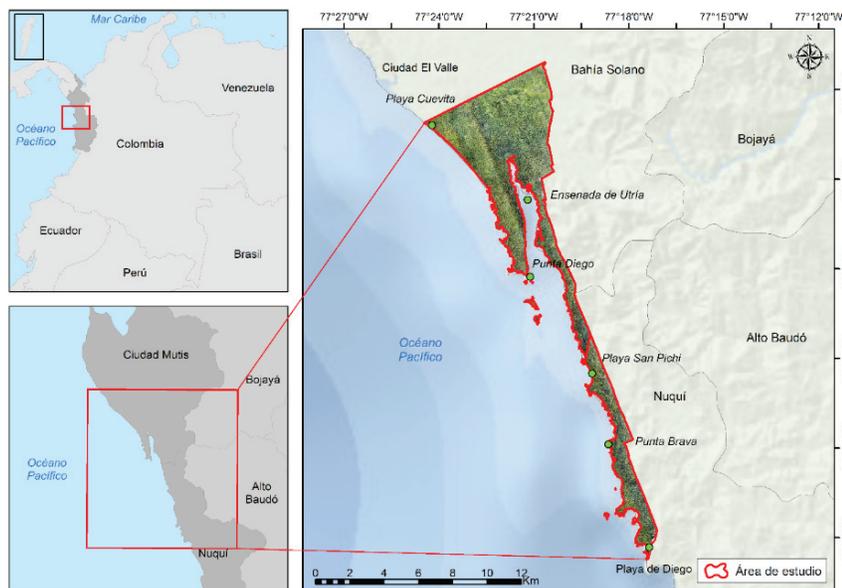


Figura 1. Ubicación del área de estudio con los límites administrativos (recuadros rojos) y ubicación del área analizada con los límites administrativos (línea roja)

PARÁMETROS DE EJECUCIÓN Y FÍSICOS

CONDICIÓN DE COURANT

El número de Courant es una relación que tiene en cuenta el área a modelar, la densidad de la malla, el intervalo de tiempo y el tiempo total o periodo a ser simulado, con el fin de lograr estabilidad computacional en cualquier programa de simulación numérica. Esta relación permite mantener una proporcionalidad entre la velocidad de propagación del fenómeno hidrodinámico y las velocidades de cálculo entre los nodos de la malla. Por lo tanto, el modelo requiere la relación establecida como condición de Courant para que su estabilidad numérica se cumpla (GIOC, 2001).

$$\Delta t = \frac{C_r \Delta x}{\sqrt{g D_{max}}} \quad (1)$$

Donde:

- Δt = Intervalo de tiempo de cálculo (s)
- Δx = Discretización espacial de la malla (m)
- D_{max} = Profundidad máxima del dominio (m)
- C_r = Número de Courant: Términos no lineales $C_r = 1$, términos lineales $C_r = 5$
- g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

COEFICIENTE DE ROZAMIENTO DE FONDO (C)

Este término define los efectos de disipación de cantidad de movimiento que los contornos producen en el

flujo, tanto en el fondo como las paredes laterales. El parámetro utilizado es el coeficiente de Chezy, el cual toma valores entre 45 y 60 m/s en zonas cercanas a la costa; se recaba qué coeficientes de Chezy altos denotan bajo rozamiento.

El rozamiento depende tanto del material que conforma el contorno caracterizado por un parámetro de rugosidad, como de la naturaleza del flujo (laminar o turbulento). Para representar la tensión tangencial en el fondo el modelo hidrodinámico H2D utiliza el coeficiente de Chezy dado por la ecuación de Colebrook-White (GIOC, 2001):

$$C = 18 \log \left(\frac{12H}{k} \right) \quad (2)$$

Donde:

- H = Altura del nivel del agua (m)
- k = Altura que representa la rugosidad del fondo de bida al tamaño del sedimento y las formas del lecho (Einstein, 1950).

COEFICIENTE DE VISCOSIDAD DE REMOLINO (VISCOSIDAD DE EDDY, ϵ)

La viscosidad de remolino (ϵ) se emplea para describir la turbulencia, en este término se incluyen varios sumandos que van desde la dispersión numérica, originada por la transformación de ecuaciones diferenciales en ecuaciones en diferencias finitas, hasta el correspondiente al promediado en vertical de las ecuaciones del flujo.

En el modelo hidrodinámico H2D la viscosidad de remolino tiene un valor constante en todo el dominio de cálculo. Esta condición se ajusta a la realidad cuando la profundidad es mucho menor que la discretización utilizada, ya que en este caso el rozamiento en el fondo es mucho más importante que la turbulencia. Para el caso de estudio, un valor orientativo de la constante de Eddy, si se asume constante, se puede obtener mediante la expresión de Elder:

$$\varepsilon = K\Delta x u \quad (3)$$

Siendo:

- Δx = Tamaño de las celdas (m)
- u = Velocidad característica dada en $1m / s$
- K = Coeficiente que varía desde 0.05 a 0.15

ANÁLISIS ARMÓNICO

Tomando el método elaborado por Dronkers (1964) se realiza con base en mínimos cuadrados, donde la marea astronómica se aproxima a la suma de esas ondas constituyentes con el fin de extraer los armónicos característicos (amplitud, frecuencia, fase) de las series de marea astronómica que servirán en la reconstrucción de la serie durante un periodo de tiempo determinado (Pawlowicz, 2002).

$$S_{MA}(t) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos(\bar{\omega}_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

Donde:

- S_{MA} = Marea astronómica como suma de armónicos (m)
- α_0 = Amplitud del nivel medio de referencia (m)
- α_i = Amplitud de la onda i (m)
- ω_i = Frecuencia de la onda componente i (Hz)
- φ_i = Desfase de la onda componente i (Hz)
- t = Instante en que se calcula la marea (s)
- n = Número de componentes consideradas

RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DEL MAR

Es la representación del comportamiento que tiene dicha variable en un año medio; con el fin de representar el nivel del mar en un régimen de probabilidades se simula esta variable considerando la marea meteorológica y la astronómica, asimismo, planteando las siguientes hipótesis:

1. El nivel del mar se compone por la suma entre la marea astronómica y la meteorológica.

2. La marea astronómica es una serie temporal determinística.
3. La marea meteorológica y astronómica son variables estadísticamente independientes.
4. La marea meteorológica se suele simular mediante técnicas de Montecarlo.

Los resultados para el régimen medio del nivel del mar se presentan en doble formato: Función de distribución (probabilidad acumulada) y número de horas al año donde se supera una cota dada. Esta relación se establece mediante:

$$N = 8760 (1 - F) \quad (5)$$

Donde:

- N = Número de horas al año en que se supera la cota dada
- 8760 = Número de horas al año
- F = Probabilidad acumulada

METODOLOGÍA

El cálculo de la cota máxima de inundación involucra un análisis por separado de las variables deterministas (marea astronómica) y estocásticas (marea meteorológica), (Otero, 2005b) y el efecto del run-up (acción del oleaje en costa). De forma general se describe la metodología empleada en este estudio para la obtención de estas variables y para el cálculo del régimen medio del nivel del mar.

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA MAREA ASTRONÓMICA

Teniendo en cuenta que en la zona de estudio no se cuenta con registros instrumentales de nivel del mar, se estableció como base metodológica la ejecución del modelo hidrodinámico H2D para el cálculo de la marea astronómica; con los pasos mencionados a continuación:

Selección y preprocesamiento de la información

La información batimétrica fue generada y suministrada por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico-CCCP. Esta se llevó al sistema de coordenadas geográfico UTM con zona 18N, debido a que este es el sistema de coordenadas geográfico correspondiente a la zona de estudio, y es también, el empleado por el modelo.

Los datos batimétricos deben estar referenciados a un mismo nivel, por lo que es necesario sumar o restar a la profundidad, la diferencia entre el *Mean Low Water*

Springs (MLWS) al que haya sido ajustada la información batimétrica con el *MLWS* específico de la zona de estudio. Es necesario que la información para la batimetría sea positiva, y se asigna el valor de -100 a la topografía del área de estudio, con el fin de garantizar la confiabilidad, estandarización y homogeneidad en la información a utilizar, para optimizar los procesos en la modelación hidrodinámica.

Generación de dominios computacionales forzantes de marea

Los dominios computacionales (DC) son uno de los principales insumos requeridos por el modelo hidrodinámico H2D, y deben tener características específicas acordes a los requerimientos del modelo, empleándose mallas con área más grande que la zona de interés donde se realizará la simulación (GIOC, 2001). Las mallas de cálculo son los archivos que integran toda la información batimétrica con datos de elevación topográfica del área de estudio, permitiendo visualizar la superficie del relieve en zonas costeras y modelar procesos naturales como el ascenso y descenso del nivel del mar (NOAA, 2018).

También, se generan los forzantes de marea, empleando la base de datos *Grenoble*, teniendo en cuenta las coordenadas geográficas de los puntos externos del dominio computacional y el periodo a simular en días (Andersen *et al.*, 1995).

Parámetros físicos y de ejecución

Los parámetros de ejecución que se determinan son: El tiempo de simulación (h), el paso de tiempo del modelo garantizando que se cumpla el criterio de Courant (s), los términos no lineales, y los parámetros de inundación/secado, ya que en el área de estudio existen zonas susceptibles a ser inundadas y secadas durante un ciclo de marea (Otero, 2005b). En cuanto a los parámetros físicos se deben definir los coeficientes de Chezy (m) y de viscosidad de remolino (m^2 / s).

Ejecución del modelo H2D

La ejecución del H2D se realiza teniendo en cuenta la información espacial (DC), los forzantes de marea y los parámetros físicos y de ejecución específicos para la zona de estudio. También se ubican diferentes puntos de interés (mareógrafos virtuales-MV), a lo largo de la zona de estudio, de los cuales se mostrarán la amplitud de marea simulada (Agudelo, 2003).

Calibración del modelo hidrodinámico H2D

Para calibrar el modelo es recomendable ejecutarlo como mínimo por 720 horas, que corresponde a un mes, y es el tiempo en el que han pasado las fases lunares (DIMAR-CCCP, 2018); y comparar la serie de nivel del mar con los valores obtenidos por un mareógrafo cercano que presente condiciones de marea similares a los puntos sintéticos seleccionados en el área de estudio para así, determinar el incremento en el tiempo adecuado para la simulación de 19 años del modelo hidrodinámico, donde es necesario que no haya saltos en la información ni fechas con valores sin dato.

Con el modelo ajustado y calibrado se realizan las modelaciones para completar 19 años de simulación para la generación de las series horarias de marea astronómica en los MV del área de estudio.

Análisis armónico

Para las señales sintéticas obtenidas, a partir de la modelación numérica de cada uno de los MV ubicados en los puntos de interés, es necesario realizar un análisis armónico, con el fin de extraer los armónicos característicos (amplitud, frecuencia, fase) de las series de marea astronómica que servirán en la reconstrucción de la serie durante un periodo de tiempo determinado. Este análisis se aplica usando la rutina *T_tide*, desarrollada en el software Matlab (Pawlowicz *et al.*, 2002).

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA MAREA METEOROLÓGICA

Para el cálculo de la marea meteorológica se adoptaron los parámetros obtenidos por Otero (2005b) para el análisis realizado a las series históricas de las estaciones de Tumaco, Buenaventura y Naos (Panamá) (DIMAR-CCCP, 2013; Otero, 2005a), ya que en la zona de estudio no se cuenta con registros instrumentales. En este caso, se empleó el método de Montecarlo, debido a que sobre la zona de interés no se contaba con suficiente información de vientos y presión.

CONSTRUCCIÓN DEL RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DEL MAR

Para la construcción del régimen medio del nivel del mar se generan 100 series de 500 años de marea meteorológica utilizando la técnica estadística Montecarlo, con los parámetros obtenidos por (Otero, 2005b); y se reconstruye una serie de 500 años de marea astronómica modelada, a partir de las constantes astronómicas calculadas en cada uno de los MV, con el fin de obtener el nivel del mar o marea resultante, que es la

suma aritmética de cada una de las series de marea meteorológica con marea astronómica (Otero, 2005b). La marea resultante promedio de 500 años es un muestreo suficiente de datos, en donde se pueden incorporar todos los posibles cambios cíclicos y, obtener la mejor representación del nivel del mar en determinada zona (DIMAR-CCCP, 2018).

EFEECTO DEL RUN-UP

El run-up se define como el alcance máximo del oleaje en la costa, y se obtiene como la suma de la sobreelevación del nivel medio del mar, producida por la rotura del oleaje (setup) y la amplitud correspondiente a las oscilaciones alrededor del setup (Díaz, 2018). La DIMAR, desde el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico-CIOHP ha adelantado procesos de medición de corrientes en el Pacífico colombiano (San Andrés de Tumaco-Nariño) (DIMAR-CCCP, 2023) y estudios de evaluación de la amenaza por tsunami en el litoral pacífico mediante simulación de escenarios con el modelo *TUNAMI N2*, como se reporta en Escobar *et al.* (2020); Guerrero *et al.* (2019); Sánchez *et al.* (2023) y a partir de este modelo se obtienen los valores de run-up en los puntos de interés para este estudio.

DETERMINACIÓN DE LA COTA MÁXIMA DE INUNDACIÓN (CMI)

De los resultados obtenidos para el régimen medio se selecciona la cota de inundación con mayor probabilidad de no excedencia (99 %) y se lleva a la altura elipsoidal, sumando el valor de la cota cero (*MLWS*) determinado para cada zona de estudio; y en los puntos expuestos a oleaje se suma el efecto run up:

$$CMI = Cota\ de\ inundación\ (99\ \% \ de\ no\ excedencia) + MLWS + run\ up \quad (6)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el área de estudio comprendida en la ensenada de Utría, desde Playa de Diego hasta Ciudad El Valle (Figura 1), se delimitó y generó un DC con 200 nodos, tanto en *x* como en *y*, siendo esta la mejor configuración para integrar toda la información batimétrica. A partir del DC se obtuvo el modelo digital de elevación (MDE) (Figura 2), para visualizar la superficie del relieve en zonas costeras y poder modelar procesos naturales de ascenso y descenso del nivel del mar con el modelo H2D. En el MDE se observan profundidades de hasta casi 2000m; y se presenta homogeneidad en la topografía, debido a que para ésta se asignó un único valor

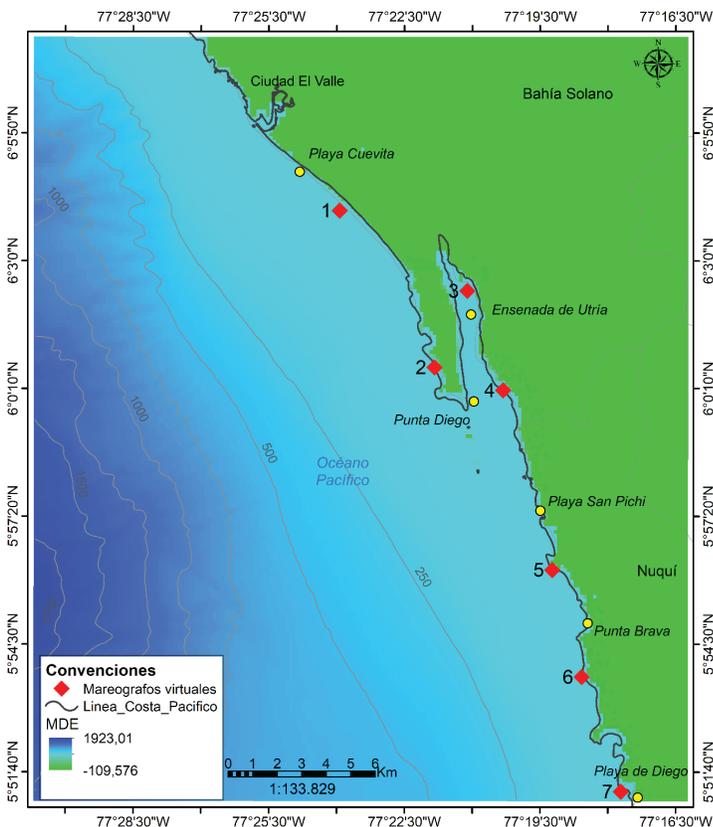


Figura 2. Modelo digital de elevación y mareógrafos virtuales en la zona de estudio

(-100), teniendo en cuenta los parámetros de entrada para el modelo H2D. A su vez, se localizaron siete MV en zonas cercanas a la costa, con profundidades inferiores a 15 m (Figura 2) con el fin de monitorear el comportamiento de la onda que llega a estas zonas, y la ubicación de los MV se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Ubicación geográfica de los mareógrafos sintéticos sobre la zona de estudio

Mareógrafo	Longitud	Latitud
1	77.398839 W	06.068457 N
2	77.363864 W	06.010563 N
3	77.351804 W	06.038804 N
4	77.338538 W	06.002090 N
5	77.320447 W	05.935724 N
6	77.309593 W	05.896186 N
7	77.295121 W	05.853824 N

Los parámetros físicos y de ejecución con los que se ejecutó el modelo H2D fueron: La constante de Chezy $k_s = 0.25m$, debido a que anteriormente se había empleado este valor para zonas del Pacífico colombiano (Vásquez *et al.*, 2015), el coeficiente de viscosidad de remolino $\varepsilon = 13.35m^2 / s$.

El incremento del tiempo (Δt) se determinó calibrando el modelo H2D con la información del mareógrafo ubicado en Bahía Solano (77.4109W, 06.2328N). Se eligió esta estación mareográfica debido a la falta de estaciones mareográficas y de mareógrafos portátiles, también porque se encuentra relativamente cerca de la zona de estudio y tiene condiciones de mareas similares a las de los puntos sintéticos seleccionados. Para un $\Delta t = 3s$, se obtuvo un $R^2 = 0.9879$ comparado con la serie de marea del 1 de enero de 2014 al 31 de diciembre del mismo año a una tasa horaria, con un total de 8760 datos.

En la Figura 3, se muestra la marea astronómica obtenida por simulación con el MV #7, ubicado en las coordenadas 77.2951W, 05.8538N comparada con la serie medida por la estación mareográfica Bahía Solano. La gráfica y el valor R^2 obtenido indican que la marea simulada respecto a la marea real presenta una gran similitud y una excelente correlación, por lo que, a pesar de la distancia geográfica entre los mareógrafos, se puede inferir que toda la zona de la ensenada de Utría tiene un comportamiento mareal equivalente al que presenta Bahía Solano; y permite también, confirmar que las series simuladas se pueden utilizar como insumo principal en la obtención de las cotas máximas de inundación en lugares donde no se cuenta con registros instrumen-

tales, por lo que, para cada uno de los MV, se construyeron los regímenes medios de marea.

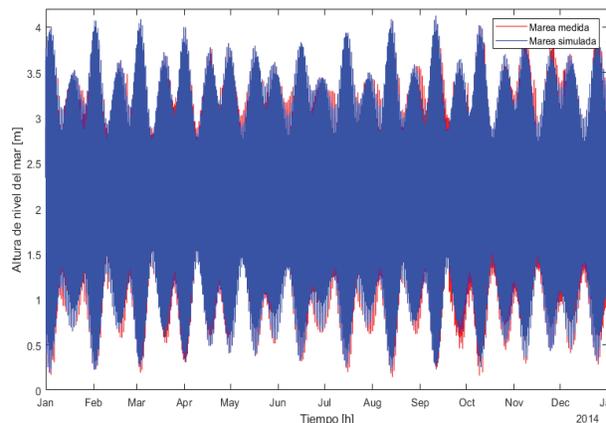


Figura 3. Comparación de la serie de marea medida y simulada para el año 2014

Para esto, en cada MV fue necesario reconstruir 500 años de marea astronómica a partir de las componentes armónicas obtenidas del análisis armónico, realizado a los resultados de la simulación del modelo hidro-dinámico H2D, en un periodo de 19 años (166560 horas); y se simularon también 100 series de 500 años de marea meteorológica, mediante el método de Monte-carlo, teniendo en cuenta los parámetros de localización y de escala de la distribución de Gumbel de máximos referidos por Otero (2005b) para los puertos del pacífico colombiano.

El régimen medio se presenta en doble formato: Probabilidad acumulada y cantidad de horas al año que se supera una cota dada, las gráficas resultantes se muestran en la Figura 4.

Los resultados para las cotas máximas de inundación en un año medio para cada MV se muestran en la Tabla 2; estas fueron calculadas con una probabilidad de no excedencia de 99 %. Se muestran respecto al cero del mareógrafo y en la columna *Cota máxima de inundación* para los MV 1, 2, 4, 5, 6 y 7 al estar ubicados en una franja costera expuesta al oleaje donde se incluye el efecto del oleaje (run-up); a partir de los valores observados se puede determinar que el nivel del mar en esta zona es similar debido a que en el área no se presentan cambios bruscos de bahías, deltas de ríos, o canales.

A su vez, Colombia como país miembro de la Organización Hidrográfica Internacional IHO se acoge a sus directrices, dando prioridad a definir y calcular datum de referencia vertical con el menor grado de incertidumbre; siendo necesario que los resultados finales estén estandarizados, que sean dependientes de la calidad, precisión y el ajustamiento local, y así permitir a DIMAR el cumplimiento de uno de sus objetivos como autoridad marítima nacional, delimitar los bienes de

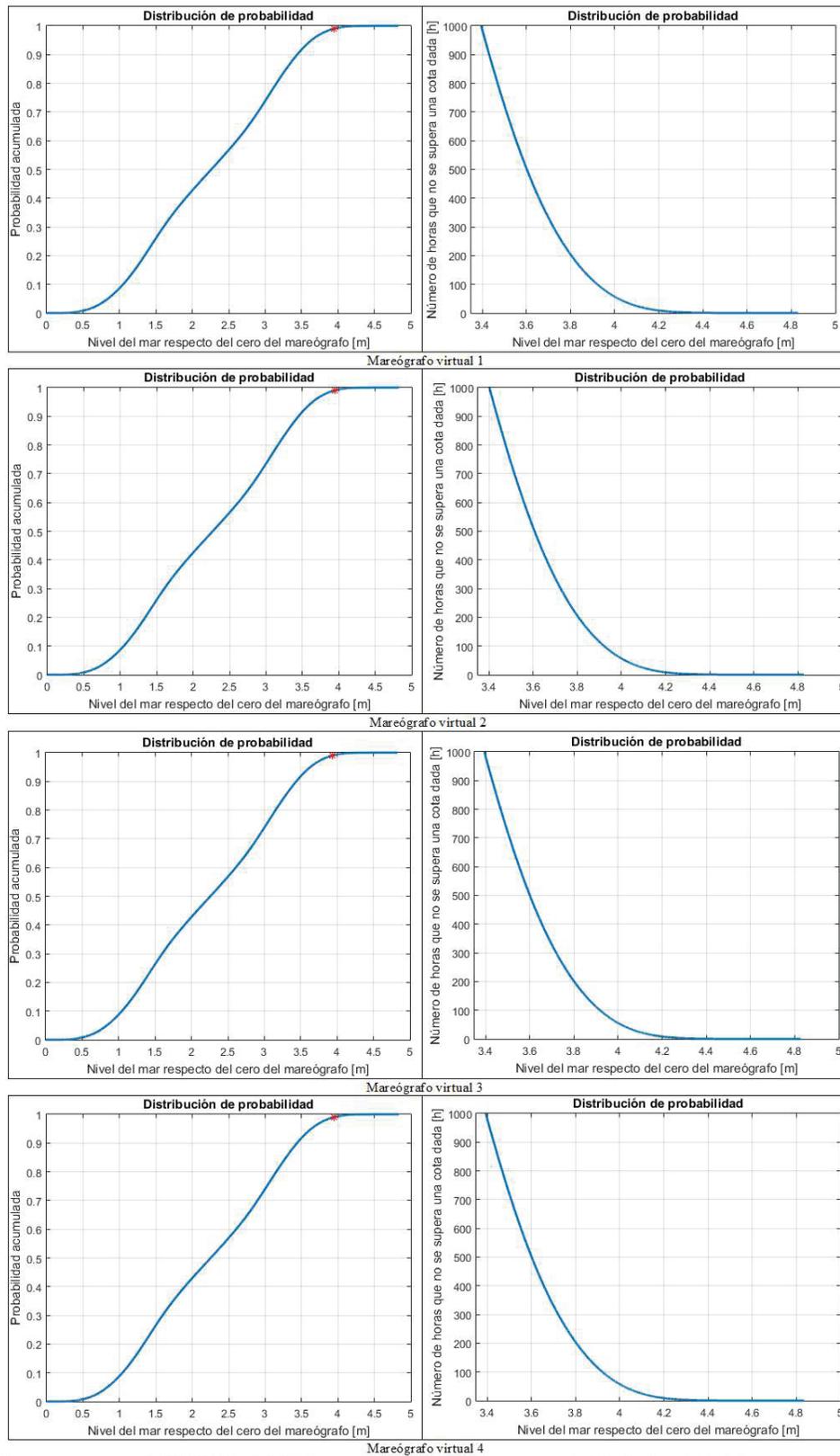


Figura 4. Régimen medio presentado en probabilidad acumulada y cantidad de horas al año que se supera una cota, para los MV (continúa ...)

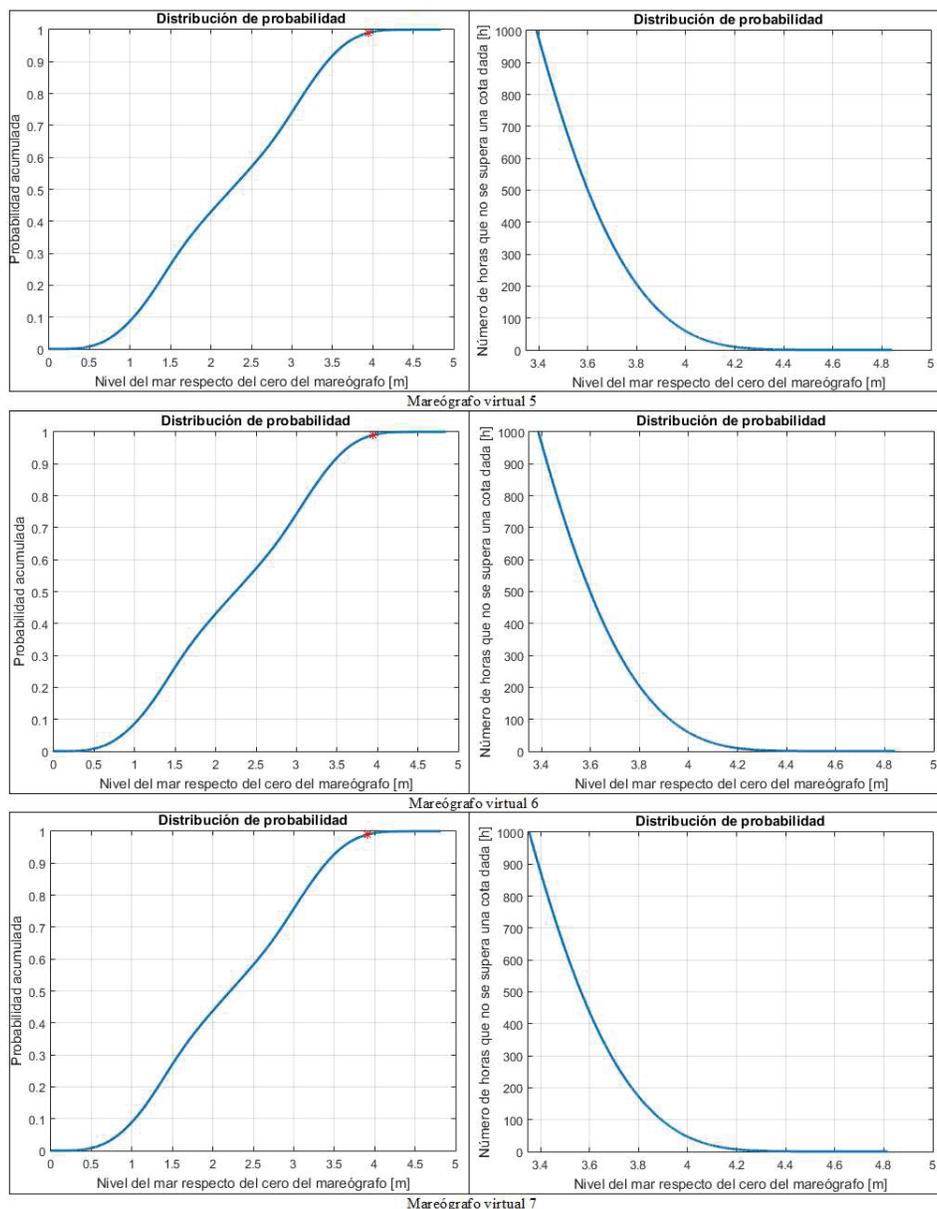


Figura 4. Régimen medio presentado en probabilidad acumulada y cantidad de horas al año que se supera una cota, para los MV (... continuación)

uso público dentro del territorio para establecer su jurisdicción en las costas (DIMAR-CCCP, 2019).

Por lo que, teniendo en cuenta, los planos de referencia de la marea calculados por el CCCP, a partir del proyecto “Red hidrográfica de referencia vertical en los principales puertos colombianos”, se referenciaron los valores obtenidos para las cotas de inundación al datum vertical *Mean Low Water Springs MLWS* calculado para el puerto de Bahía Solano, con el vértice geodésico CP10-01 ubicado en las coordenadas 06.232752N, 77.412716 W; siendo este el más cercano a los MV de la zona.

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2, en la columna *Cota máxima de inundación referida a MLWS* y a partir de ellos se puede observar que los valores finales son muy cercanos al *Highest Astronomical Tide HAT* obtenido en el vértice, el cual data $HAT = 4.5960$ m, según el certificado geodésico del vértice.

CONCLUSIONES

De la correlación $R^2 0.9879$ presentada entre las ondas simuladas en el MV más cercano al mareógrafo de Bahía Solano, se concluye que se pueden utilizar como

Tabla 2. Cotas de inundación máxima para los puntos de interés

Mareógrafo	Cota de inundación [m.s.n.m]	Cota máxima de inundación [m.s.n.m]	Cota máxima de inundación referida a MLWS [m.s.n.m]
1	3.9405	4.0359	4.4063
2	3.9405	4.0335	4.4039
3	3.9375	3.9375	4.3079
4	3.9411	3.9915	4.3619
5	3.9441	4.0353	4.4057
6	3.9434	4.0244	4.3948
7	3.9123	4.0323	4.4027

insumo principal las series simuladas a partir de modelación numérica para el cálculo de las cotas máximas de inundación en zonas del pacífico norte colombiano, donde no se cuenta con registros instrumentales de nivel del mar mediante el modelo H2D, representando una aproximación al comportamiento del nivel del mar en la zona de estudio.

De los resultados obtenidos del régimen medio del nivel del mar, se puede concluir que las cotas máximas de inundación referidas al MLWS de la zona para los MV son de 4.4063m, 4.4039m, 4.3079m, 4.3619m, 4.4057m, 4.3948m y 4.4027m.

Las cotas máximas de inundación de los MV presentan similitud en su valor, por lo que se determina que el nivel del mar en esta zona es similar, debido a que en el área no se presentan cambios bruscos en la geomorfología, sin presencia de deltas de ríos, bahías o canales. La combinación de estas con modelos de inundación, permite delimitar las zonas susceptibles a ser inundadas, confirmando una herramienta adicional que muestra un panorama general del límite por donde se debe trazar la línea de más alta marea en una zona determinada.

El comportamiento del nivel del mar, en general, es el resultado de la interacción de varios factores: La amplitud del nivel del mar, en las zonas costeras de la zona de estudio puede presentar cambios asociados a la configuración geomorfológica de la costa y a la batimetría

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó con el apoyo de los Centros de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico y Caribe.

REFERENCIAS

Agudelo, P. (2003). *Cota de inundación del litoral Pacífico colombiano*. (Tesis de máster). Universidad de Cantabria. Santander, España.
 Andersen, O. B., Woodworth, P. L., & Flather, R. A. (1995). Inter-comparison of recent ocean tide models in the present. *Journal*

of Geophysical Research, 100(12), 25261-25282. <https://doi.org/10.1029/95JC02642>
 Andrade-Amaya, C. A. (2003). Sobre variaciones del nivel del mar en la zona costera colombiana. *Memorias del seminario taller internacional de geología marina y costera*. 15, p. 59.
 Banco de Occidente. (2002). *Libros de la Colección Ecológica del Banco de Occidente: Golfos y Bahías de Colombia*. iM Editores. Recuperado de <https://www.imeditores.com/banocc/golfos/>
 Banco de Occidente. (2007). *Libros de la Colección Ecológica del Banco de Occidente: Deltas y Estuarios de Colombia*. iM Editores. Recuperado de <https://www.imeditores.com/banocc/deltas/cap7.htm>
 Banco de Occidente. (2009). *Libros de la Colección Ecológica del Banco de Occidente: El Chocó Biogeográfico de Colombia*. iM Editores. Recuperado de <https://www.imeditores.com/banocc/choco/presentacion.htm>
 Blanco-Pinzón, L., & Ladino-Martínez, J. J. (2014). Determinación de la cota máxima de inundación para el diseño de pozo de explotación petrolera «Titán». Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/1669>
 Calero, R., Carta, J., & Padrón, J. (2006). Energía: Programa educativo eficiencia energética. En: *Curso de formación para profesores*, 555-558.
 Cea, L., Sopelana, J., & Ruano, S. (2017). Determinación de la inundación en tramos de ríos afectados por marea basada en la simulación continua de nivel. *Ingeniería del agua*, 21(4), 231-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/ia.2017.8770>
 CIOH-Cardique. (1998). Caracterización y diagnóstico integral de la zona costera desde Galerazamba hasta Bahía de Barbacons y Censo Franja Litoral Caribe.
 COMET. (2007). *Introducción a las mareas oceánicas*. University Corporation for Atmospheric Research.
 Díaz-García, C. (2018). *Análisis numérico del efecto de la marea y barreras sumergidas en el runup en playas disipativas y reflejantes*. Universidad de Cantabria.
 DIMAR-CCCP. (2019). *Generación de la información técnica y científica para la administración de los litorales colombianos*.
 DIMAR-CCCP. (2013). *Zonificación fisiográfica del litoral pacífico colombiano. Fase I*. Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico.

- DIMAR-CCCP. (2018). Proyecto: Generación de la información técnica y científica para la administración de los litorales colombianos (Fase III). DIMAR-CCCP, Ed.
- DIMAR-CCCP. (2023). Geo-visor de mediciones de corrientes costeras con ADCP V.5. Recuperado de <https://dimar.maps.arcgis.com/apps/dashboards/e2bece0b1cfd44de589b1a6f8f508961f>
- Dronkers, J. J. (1964). *Tidal computations in rivers and coastal waters*. Amsterdam, New York: North-Holland Pub. Co.; Interscience Publishers.
- Einstein, A. (1950). The bed load function for sediment transport in open channel flows. *Technical Bulletin*, 1026, 1-71. Recuperado de https://ponce.sdsu.edu/einstein_bedload_function.pdf
- Escobar, R. S., Díaz, L. O., Guerrero, A. M., Galindo, M. P., Mas, E., Koshimura, S., Adriano, B., Urrea, L., & Quintero, P. (2020). Tsunami hazard assessment for the central and southern pacific coast of Colombia. *Coastal Engineering Journal*, 62(4), 540-552. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1818362>
- Fernández-Herranz, D. (2011). Marea y variación del nivel del mar. GIOC. (2001). Manual de referencia modelo Numérico H2DII.
- GIOC. (2002). Atlas de inundación del litoral peninsular español. Documento temático. Ministerio del medio ambiente y Universidad de Cantabria.
- Guerrero-Castillo, A. M., & Sánchez E., R. (2019). Evaluación de la amenaza por tsunamis en poblaciones del sur, centro y norte del litoral pacífico colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 38(2). <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.524>
- IDEAM. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Ministerio del Medio Ambiente. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2016). Pronóstico de pleamares y bajamares costa pacífica colombiana.
- Instituto Geográfico Nacional-2021. La Red de Mareógrafos. Recuperado de <https://www.ign.es/web/ign/portal/gds-la-red-mareografos>
- Jigena-Antelo, B. (2015). Determination of the mean sea level in the bransfield sea. Application to determination of the geoid at Deception and Livingston islands (Antarctica). Universidad de Cadiz. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10498/22995>
- Kjerfve, B. (1981). Tides in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 86(C5), 4243-4247.
- Ministerio de Defensa. (1984). Decreto Ley 2324 de 1984.
- NOAA. (2018). NCEI Development of Coastal DEMs.
- Organización Colparques. (1996). Organización Colparques. Utría Parque Nacional Natural.
- Otero, L. (2005a). Aplicación de un modelo hidrodinámico bidimensional para describir las corrientes y la propagación de la onda de marea en la Bahía de Buenaventura. *Boletín Científico CCCP*, 12, 9-21. https://doi.org/10.26640/01213423.12.9_21
- Otero, L. (2005b). Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas (bahías, estuarios, etc.) cuando no se tienen registros instrumentales.
- Pawlowicz, R., Beardsley B., & Lentz S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- Pedlosky, J. (1987). *Geophysical fluid dynamics*. New York: Springer.
- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes. Recuperado de <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235778>
- Rangel, E. S., & Montealegre, J. E. (2003). Análisis de las series de nivel de mar en el Pacífico colombiano y su relación con el cambio climático. *Meteorología colombiana*, 7.
- Sánchez-Escobar, R. E., Quintero-Rodríguez, P. A., Realpe-Martínez, F. H., Ruíz-Figueroa, D., & Paz-Quintero, J. C. (2023). Evaluación de la amenaza por tsunamis en el litoral Pacífico colombiano: Caso de estudio Guapi. Departamento del Cauca. En: *Investigaciones en gestión del riesgo de desastres para Colombia. Contribuciones locales, regionales y nacionales*. Editorial UNAL.
- Sánchez, R. E. (2008). Determinación de la línea de más alta marea para el litoral pacífico colombiano, aplicando métodos de modelación numérica. (Informe técnico).
- Taylor-Casals, R., Osorio-Pérez, P. J., Pérez-López, O. E., & Pérez-Parrado, R. (2019). Determinación de los incrementos del nivel del mar en Guanabo por causas meteorológicas. X Congreso Cubano de Meteorología. Recuperado de <http://repositorio.geotech.cu/jspui/handle/1234/4121>
- Universidad de Las Palmas. (2013). Mareas y Corrientes.
- Vásquez, L., Guerrero, A., & Sánchez, R. (2015). Implementación del modelo de gestión de la información para el sistema nacional de alertas por amenazas de origen marino. Fase III.
- Vásquez, L. M., Iriarte, J. D., & Sánchez, R. E. (2018a). Determinación de las cotas máximas de inundación, mediante modelación numérica, en Bahía Solano Chocó. *Boletín Científico CIOH*, 37, 17-34. <https://doi.org/10.26640/22159045.447>
- Vásquez, L., Iriarte, J., & Sánchez, R. (2018b). Determinación de la cota máxima de inundación en la frontera colombo-ecuatoriana aplicando modelación numérica. *Boletín Científico CIOH*, 37, 3-16 <http://dx.doi.org/10.26640/22159045.446>

Cómo citar:

Camacho-De Angulo, Y. V., & Oviedo-Barrero, F. (2023). Modelación numérica para la determinación de la cota máxima de inundación, en la Ensenada de Utría desde Playa de Diego hasta Ciudad El Valle-Chocó. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24 (04), 1-12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.4.029>