

Banco de escenarios tsunami para el Caribe colombiano: caso de estudio, Cartagena de Indias

Bank of tsunami scenarios for the Colombian Caribbean: case study, Cartagena de Indias

DOI: 10.26640/22159045.432

Fecha de recepción: 2017-06-30 / Fecha de aceptación: 2017-09-22

Anlly Melissa Guerrero*, **Laura Marcela Vásquez**** y **Ronald Sánchez E.*****

Guerrero, A., Vásquez, L. y Sánchez, R. (2017). *Banco de escenarios tsunami para el Caribe colombiano: caso de estudio, Cartagena de Indias.* Bol. Cient. CIOH (35):63-79. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.432

RESUMEN

En el Caribe colombiano no ha habido progresos significativos sobre el estudio de la amenaza por tsunami, debido a la baja actividad sísmica que se presenta en esta zona. Sin embargo, según los registros históricos, no se encuentra exenta de la ocurrencia de este tipo de fenómenos naturales que pueden causar pérdidas económicas y de vidas humanas. Por esta razón, en la presente investigación se realizó la simulación numérica de siete posibles escenarios sísmicos generadores de tsunami ubicados en el mar Caribe, utilizando el modelo numérico COMCOT, obtenidos a partir de una aproximación determinista, con el fin de generar los escenarios de inundación por tsunami para Cartagena.

PALABRAS CLAVES: Cartagena de Indias, modelación numérica, tsunami, inundación por tsunami, técnica determinista, mareograma sintético.

ABSTRACT

In the Colombian Caribbean there has been no significant progress on the study of the tsunami threat, due to the low seismic activity that occurs in this area. However, according to historical records, it is not exempt from the occurrence of this type of natural phenomena that can cause economic losses and human lives. For this reason, in the present investigation the numerical simulation of seven tsunami generating seismic scenarios located in the Caribbean Sea was performed, using the COMCOT numerical model, obtained from a deterministic approach, in order to generate the flood scenarios by tsunami for the city of Cartagena.

KEY WORDS: *Cartagena de Indias, numerical modelling, tsunami, tsunami flood, deterministic technique, synthetic mareogram.*

* Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo: aguerrero@dimar.mil.co.

** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo electrónico: lvasquez@dimar.mil.co.

*** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo: rsanchez@dimar.mil.co.

INTRODUCCIÓN

En el océano Atlántico, a diferencia del Pacífico, en la costa este de Estados Unidos y en el Mid-Atlantic Ridge, no se encuentran placas tectónicas chocándose o deslizándose; como consecuencia de esto, la actividad sísmica y volcánica tiene poca frecuencia en el mar Caribe. Las zonas más activas, se concentran en las islas caribeñas, y en las islas del Arco de Escocia, cerca de la Antártida (Correa, 2013). En el Caribe, en los límites tectónicos, se originan principalmente: La Fosa Mesoamericana donde limita la placa Cocos y Caribe; el sistema de fallas Polochic-Motagua-Swan, originado por el límite entre la placa Caribe y norteamericana; el Cinturón deformado del norte de Panamá, considerado como una zona de subducción dentro de la placa Caribe (Fernández, 2002). Estas condiciones geotectónicas, han sido causantes de 124 eventos de *tsunamis* reportados hasta 1998 en O'Loughlin y Lander (2003) y 91 reportados hasta 1997 en Lander, Whiteside y Lockridge (2002), de los cuales 27 se han verificado por diferentes autores (Correa, 2013).

La última alerta de posible *tsunami* en el mar Caribe, se realizó el 23 de julio de 2015, reportado por El Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico. El boletín informó acerca de una erupción de tamaño importante debida al volcán submarino Kick'em-Jenny, ubicado a ocho kilómetros de la costa norte de la isla de Granada, al oeste de las islas Ronde y Caille en estado de alerta naranja. De haberse generado el *tsunami* las olas llegarían a la costa norte de Venezuela en 40 minutos, mientras que las islas de Sotavento y Puerto Rico en hora y media, sin existir peligro alguno para las costas colombianas (Conred, 2015).

En Colombia se proyecta que para el año 2015 la población que reside en la costa Caribe sea aproximadamente el 19.2 % de la totalidad del país (DANE, 2015), además considerando que una parte importante de este porcentaje se ubica sobre el borde costero; es posible inferir que estos habitantes se encuentran expuestos a un tsunami, lo que significa que es importante estimar la vulnerabilidad de los asentamientos costeros amenazados, definiendo áreas potenciales de inundación ante un posible evento.

Así, teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia el riesgo al que está expuesta la ciudad de Cartagena de Indias, por lo que surge la necesidad de obtener un banco de escenarios de tsunami, que permita evaluar este tipo de amenaza y a su vez proporcione información acerca del tiempo de llegada de la primera ola de tsunami y la máxima altura de lámina inundante. Los escenarios pre-computados se obtuvieron mediante la aplicación de distintas técnicas propias del estudio del fenómeno y comprenden las siguientes etapas: como primera medida, se crearon los dominios computacionales a partir del procesamiento y edición de la información base (topografía y batimetría). Como segunda etapa, se definieron los parámetros sísmicos de siete escenarios de tsunami ubicados en el mar Caribe a partir de la técnica determinista. Finalmente, se simuló los escenarios seleccionados, haciendo uso del modelo numérico COMCOT V1.7 (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model); mediante el cual es posible obtener una estimación del nivel de afectación que podría ocasionar un evento tsunamigénico sobre la población costera evaluada y con esta información a futuro, sea posible planificar estrategias para disminuir dicha vulnerabilidad. La presente investigación, presenta los resultados de inundación de siete escenarios sísmicos para la ciudad de Cartagena de Indias, mediante el cual se evalúa la generación y propagación del tren de olas de *tsunami*, y el nivel de inundación que afectaría a la población costera.

ÁREA DE ESTUDIO

El Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias (Figura 1), área bajo estudio, se encuentra al oeste del Caribe colombiano, en el departamento de Bolívar, su ubicación geográfica se halla entre latitudes 10.283°N - 10.492°N y longitudes entre 75.450°W - 75.617°W. Es una ciudad que se encuentra a orillas del mar Caribe, limitando al oriente con los municipios de Santa Catalina, Santa Rosa, Turbaco y Turbaná; al norte y al occidente con el mar Caribe, y al sur con el municipio de Arjona. Debido a la ubicación geográfica y las características propias del terreno, hacen que esta población tenga un alto riesgo frente a un evento de tsunami, que aunque no son muy frecuentes en esta zona, podrían ocasionar la pérdida de vidas humanas

y daños en la infraestructura colonial de su metrópoli, lo que significa una gran decadencia

para el turismo, que atrae a propios y a visitantes desde distintos lugares del mundo.

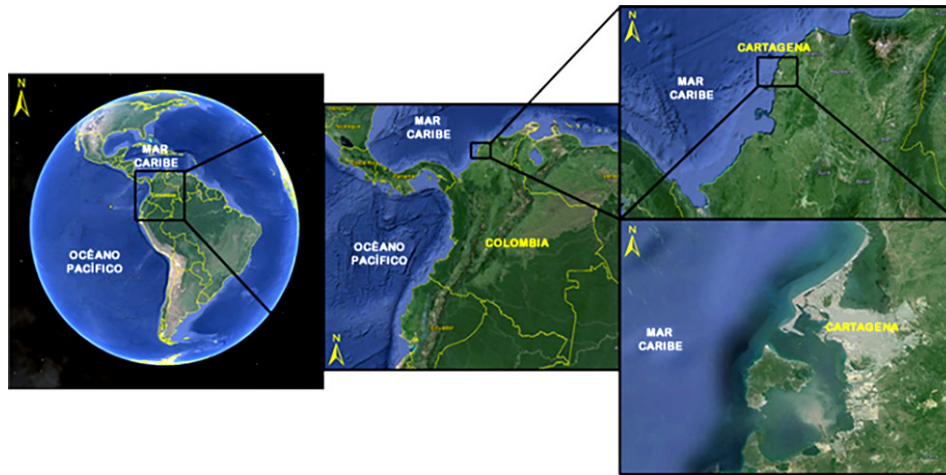


Figura 1. Área general de estudio, Cartagena de Indias. (Imágenes de Google Earth).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada está basada en la modelación numérica de escenarios de tsunami, mediante la implementación de la técnica determinista. Dicha técnica permitió definir los eventos extremos creíbles de tsunami, con base en estudios científicos centrados en sismicidad histórica, geodinámica y sismotectónica de la zona de estudio, teniendo en cuenta la existencia de rugosidades, asperezas o lagunas sísmicas, generados por la ocurrencia de distintos sismos acontecidos en el mar Caribe. Lo anterior permitió determinar siete escenarios de tsunami ubicados entre los límites de la placa Caribe con una actividad sísmica importante.

A continuación, se darán a conocer los resultados de la simulación, que involucra los "peores escenarios creíbles", los cuales contienen la distribución de inundación de las zonas evaluadas, la información de altura de la primera ola y el tiempo de arribo a la población.

Delimitación del área de trabajo

Si bien es necesario contar con una excelente calidad en los datos de entrada, se hace también imprescindible contar con la mayor cantidad de información topobatemétrica, que permita realizar una apropiada selección de las áreas de trabajo para generar de esta manera, los

dominios computacionales utilizados en la configuración general de los parámetros de entrada en el modelo numérico.

Estos dominios contienen la información necesaria para representar la geomorfología tanto del suelo como del lecho marino para toda la zona de estudio. Cada dominio tendrá un conjunto de rejillas, que permitirá el acople de las zonas a evaluar en distintos niveles de anidación. Estas mallas computacionales son introducidas en el modelo numérico, y se rigen por medio del sistema de ecuaciones, ya sea de tipo lineal o no lineal (en aguas profundas, o en aguas someras, respectivamente) (Wang, 2009), y deben cumplir con los estándares especificados en (U. Cornell, 2015).

El modelo numérico seleccionado es el COMCOT (por sus siglas en inglés, Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model), desarrollado por The School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University en cabeza de Yongsik Cho y S. N. Seo, y modificado por Wang Xiaoming en el Instituto de Geología y Ciencias Nucleares de Nueva Zelanda (GNS), siendo empleada la versión 1.7 para el desarrollo de esta investigación. Este modelo adopta el esquema de diferencias finitas escalonada "salto de rana", para resolver ecuaciones de aguas someras tanto en coordenadas esféricas como cartesianas (Wang, 2009).

Inicialmente, se selecciona una región global, de la cual se toma un sistema multimallas en diferentes niveles o tamaños de cuadrícula, que a su vez permite una correcta evolución por las diferentes regiones donde se propagan las ondas de tsunami. La región con el mayor tamaño de cuadrícula se llama red de primer nivel y de ahí en adelante, reciben el nombre

de redes de segundo nivel, de tercer nivel y así sucesivamente; también es posible definir hasta un 12 nivel de malla (Wang, 2009).

El juego de mallas para la ciudad de Cartagena se representa por los espaciamientos 30, 90, 450 y 1.830 metros, respectivamente, y cuyo arreglo espacial se muestra en la Figura 2.

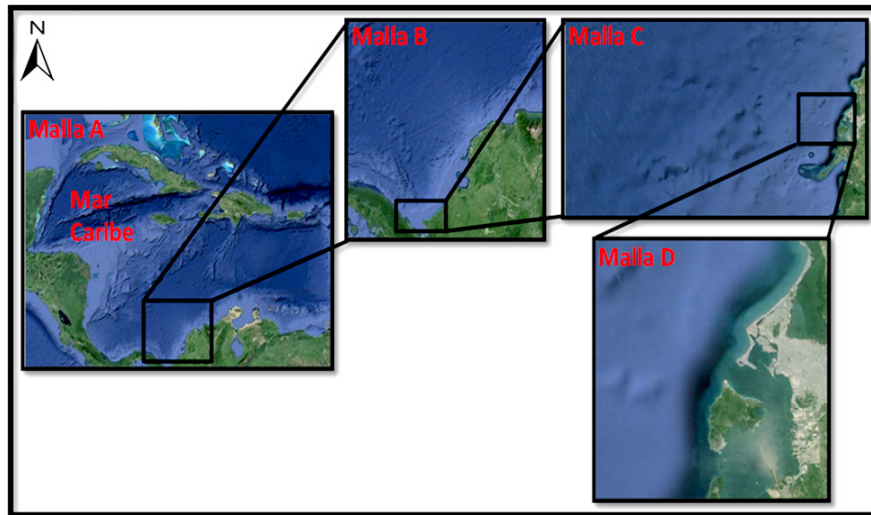


Figura 2. Arreglo de mallas computacionales correspondiente a Cartagena de Indias, mediante los parámetros definidos en la Tabla 1. (Imágenes de Google Earth).

La malla A presenta un espaciamiento de 1830 m, y abarca el lugar de generación del evento sísmico, mientras la malla B y C, cuyo espaciamiento es de 450 y 90 metros respectivamente, representa la propagación de las ondas de tsunami en aguas profundas,

y finalmente, se llega a la fase de inundación (malla D con espaciamiento de 30 metros), donde se evalúan en detalle los efectos del *tsunami* sobre la población evaluada. Los límites y tamaños de cada arreglo computacional se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del arreglo de mallas computacionales utilizando el modelo COMCOT, las coordenadas están en WGS84.

MALLA	ÁREA COMPRENDIDA	LÍMITE INFERIOR IZQUIERDO (O)	LÍMITE SUPERIOR DERECHO (O)	TAMAÑO CELDA
A	Caribe	-88.9877 ; 7.0038	-62.1877 ; 25.1038	1830 m
B	Caribe Colombiano	-79.1002 ; 7.7247	-73.4127 ; 13.4997	450 m
C	Costa Departamento Bolívar	-77.0694 ; 9.8963	-75.4519 ; 10.8513	90 m
D	Casco urbano Cartagena	-75.7119 ; 10.2669	-75.4738 ; 10.4994	30 m

Definición escenario sísmico

En el mar Caribe existen algunos fenómenos naturales que a pesar de ser poco frecuentes, tienen alta relevancia sobre las actividades humanas debido a sus efectos negativos. Tal es el caso de los tsunamis, donde la mayoría de estos son de origen tectónico, considerando que cerca del 90 % son producidos por el movimiento de una placa respecto a la otra (von Hillebrandt-Andrade, 2010). La Figura 3 muestra

la región del mar Caribe con las fronteras entre las placas (zona donde se genera la mayor parte de los tsunamis); representándose gráficamente dichos eventos con círculos de diferentes tamaños y colores. Los círculos de color rojo y tamaño grande, fueron los más destructivos y los de color blanco y más pequeños, fueron los menos destructivos. Además, es posible distinguir entre las placas, el límite convergente (línea verde), límite divergente (línea roja), y transformante (línea amarilla).

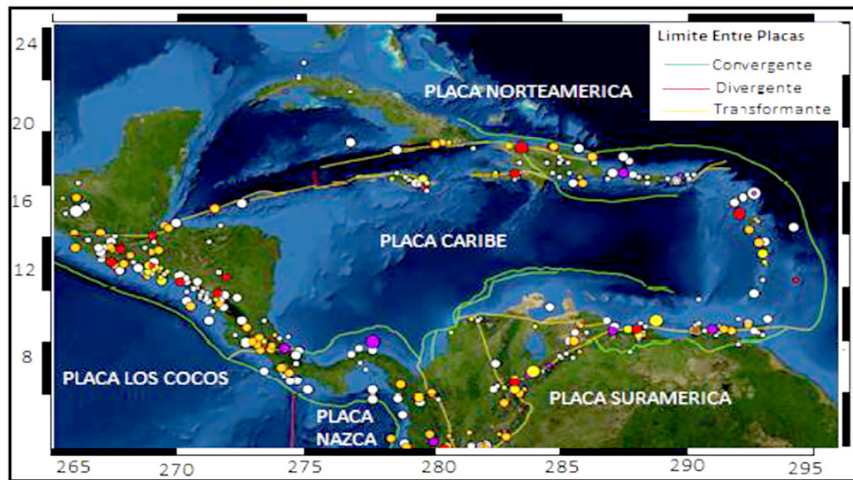


Figura 3. Tsunamis en el mar Caribe con línea de frontera entre placas (NOAA, 2015). Todos los sismos en el mar Caribe de los catálogos National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) e Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS).

El límite de placas Norteamérica-Caribe consiste en una zona de fallas activas de 100 a 260 km de ancho y de alrededor de 2000 km de extensión, zonas de fallas Chixoy - Polochic - Motogua - falla Swan - falla Oriente - sistema septentrional - falla Puerto Rico. La sismicidad del segmento occidental de la zona límite Caribe-norteamericana es superficial,, con excepción del extremo Pacífico, mientras que desde el este de Cuba oriental y hacia Puerto Rico, las profundidades de los terremotos pueden ser incluso de alrededor de los 100 km (Álvarez, *et al.*, 1985).

El contacto lateral de las microplacas es a través del sistema de fallas Bonao de dirección NW, que ha sido estudiado por distintos especialistas. Estas microplacas tienen al norte y al sur dos sistemas de fallas activas (Figura 4): (1) falla oriente - falla septentrional falla

Camú - falla Puerto Rico; y (2) falla Walton - falla Enriquillo / Plantain Garden - falla Muertos.

La siguiente representación (Figura 5) muestra la sucesión lateral de cuatro bloques, que aunque son diversos en su composición, morfología, y dinámica, dependen del sistema de placas litosféricas Norteamérica - Caribe. Con esta clasificación no solo se explican los distintos valores de velocidad relativa, la sismicidad y los mecanismos focales, sino que resuelve la independencia dinámica de las microplacas (o bloques) de la zona límite septentrional con relación a las zonas interiores de las placas Caribe y Norteamérica.

Mediante el método empleado por (Correa, 2013), se identificaron las longitudes de las fallas y a partir de las relaciones de escala establecidas y propuestas por (Kanamori y Anderson,

1975; Papazachos, Scordilis, Panagiotopoulos, Papazachos y Karakaisis, 2004; Rousseeuw y Leroy, 1987; Wells y Coppersmith, 1994); se relacionaron las dimensiones geométricas (Longitud, Ancho, Área y desplazamiento vertical) con las magnitudes y momentos sísmicos M_o .

Para obtener las relaciones de escala de magnitud, el momento sísmico y la energía, con los parámetros de falla se utilizaron dos métodos, (1) Una estimación aproximada de

los parámetros de una falla relevante cuando M , M_o o la energía sísmica (E_s) del evento, son conocidos a partir de la evaluación de los datos instrumentales; (2) Una magnitud, momento y / o estimaciones de energía para los eventos históricos o prehistóricos incluso, para los que no hay datos disponibles; sin embargo, algunos parámetros de falla tales como longitud de ruptura y/o cantidad de desplazamiento de la superficie, todavía se pueden determinar de las pruebas de campo.

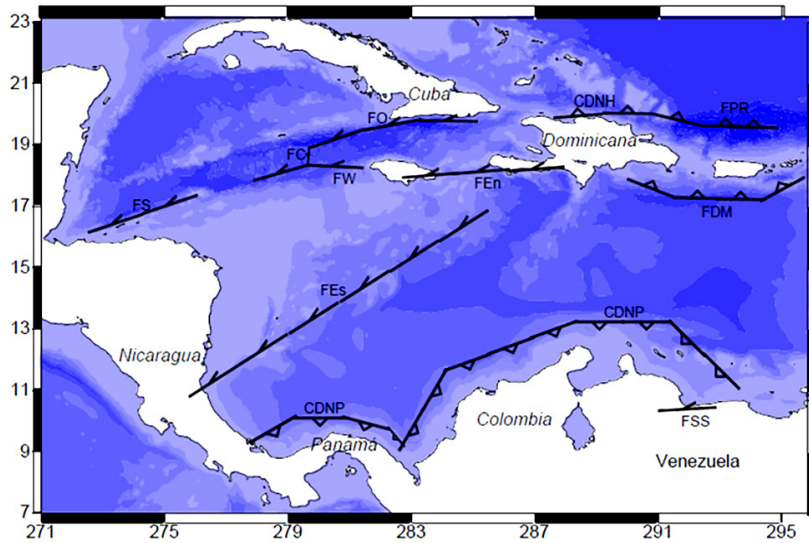


Figura 4. Fallas en el Caribe. Fs=Falla Swan; FC=Falla Caimán; FO=Falla Oriente; FW=Falla Walton; FEn=Falla Enriquillo; Fes=Falla Escarpe; CDNP=Cinturón Deformado del Norte de Panamá; FSS=Falla San Sebastian; FDM=Fosa de los Muertos; FPR=Fosa Puerto Rico; CDNH= Cinturón Deformado del Norte de la Española. (Correa, 2013).

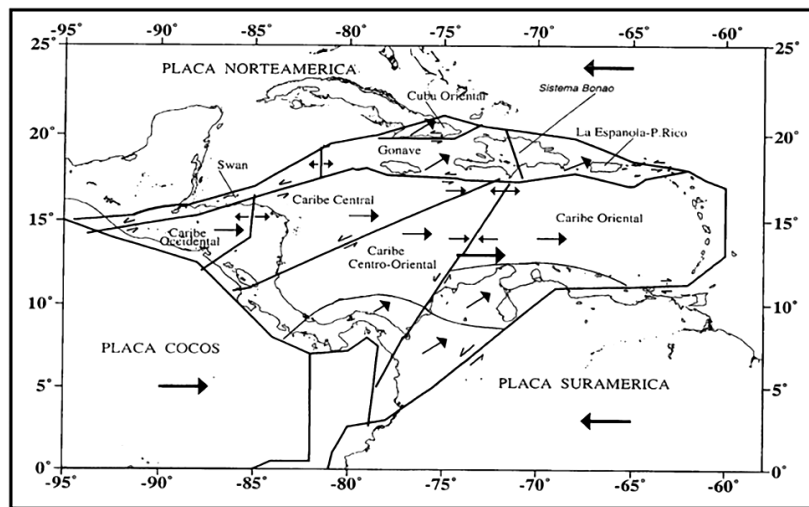


Figura 5. Bloques principales de la placa Caribe y de su margen septentrional. (Cotilla y Udías, 1999).

Igualmente, se encontró por medio de la relación presentada en (Wells y Coppersmith, 1994), que es posible establecer una relación entre la longitud de la falla o el área de la misma

para cualquier tipo de falla o fallas específicas. A partir de esta información se procedió a construir las dimensiones máximas de ruptura (Tabla 2).

Tabla 2. Longitudes máximas de ruptura, magnitudes de escala, y epicentro, en el sistema WGS84.

Fuente	Longitud (°W)	Latitud (°N)	Largo (km)	Ancho (km)	Área (km ²)	Desplazamiento (m)
Panamá	-77.9978	9.9223	277.04	26.64	7380.34	4.34
Escarpe	-82.2132	12.2581	170.21	25.23	4294.39	1.8
Swan	-86.6556	16.9330	214.0	31.0	6634	7.42
Oriente	-81.2580	18.9115	175.0	32.5	5687.5	5.92
Enriquillo	-72.4611	18.3392	123.52	26.54	3278.22	3.47
Puerto Rico	-67.5000	18.5000	191.0	55.0	10505	6.0

En cuanto a la adquisición de los mecanismos focales, se tomaron los resultados obtenidos en la metodología empleada en (Correa, 2013), cuya selección se efectuó a partir de la revisión del catálogo CMT y la evaluación de los diferentes valores. Se representaron las fallas en el mar Caribe, encontrando la longitud y el ángulo de rumbo para cada falla. En cuanto a la profundidad del sismo, se tomó la menor del catálogo CMT; mientras que para

el cálculo de los ángulos de buzamiento y cabeceo, se realizaron pruebas de simulación para seleccionar los mecanismos focales que generaría la mayor amenaza para el litoral Caribe colombiano, incluyendo su zona insular, para cada una de las fallas seleccionadas (Tabla 3). Para la falla Puerto Rico, no se realizaron simulaciones que evaluaran los mecanismos focales puesto que se tomaron del trabajo de (Harbitz *et al.*, 2012).

Tabla 3. Mecanismos focales para los "peores escenarios creíbles" del mar Caribe.

Fuente	Strike (°)	Dip (°)	Slip (°)	Prof. Focal (km)
Panamá	292.0	88.0	84.0	12.3
Escarpe	63.0	58.0	- 43.0	15.0
Swan	72.0	85.0	151.0	10.0
Oriente	79.0	72.0	82.0	10.0
Enriquillo	90.0	90.0	85.0	12.0
Puerto Rico	100.0	80.0	85.0	16.4

Además de los escenarios mencionados en la tabla anterior, se tomó un último escenario para el Cinturón Deformado del norte de Panamá, basado en el ejercicio "CARIBE WAVE/LANTEX 15" SW Caribbean Scenario (Red Sísmica de Puerto Rico, 2015). Este es un simulacro de tsunami con dos escenarios para el Caribe y la región del Atlántico de Estados Unidos y Canadá: el Escenario del Caribe suroccidental y el Escenario de Florida. En la presente investigación se toma el primer escenario de tsunami, el cual es generado por un terremoto al norte de Panamá.

En el escenario del Caribe suroccidental, se utilizan como referencia las observaciones relativas a los terremotos y *tsunamis* ocurridos en la costa de Panamá en 1882 (M8.0) y 1991 (Mw7.6) (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2015).

A continuación se dan a conocer los parámetros del hipocentro del escenario propuesto (Tabla 4).

Tabla 4. Escenario propuesto para ejercicio "CARIBE WAVE/LANTEX 15".

Plano de falla	Latitud	Longitud	Profundidad Focal (km)	Largo (km)	Ancho (km)	Desplazamiento (m)
Segmento Sur Este	9.4819°N	77.5605°W	5.0	182.0	60.0	13.0
Segmento Sur Oeste	9.8742°N	80.0743°W	5.0	120.0	40.0	9.0

En sí, el plano de falla está compuesto de dos segmentos (1) Segmento sur este y (2) Segmento sur oeste.

Nivel de marea

El nivel del mar en cualquier instante se ve afectado principalmente por dos procesos naturales: la marea astronómica, que es el proceso que más afección tiene en el ascenso y descenso periódico del nivel del mar, y es debida a la fuerza de atracción gravitacional que ejerce la luna y el sol sobre la masa de agua terrestre; y la marea meteorológica, que es generada por la presión atmosférica y por el viento (Valls y Josep, 2009). Así como también, por factores no astronómicos como línea costera, distribución geográfica, topografía local, profundidad de las cuencas oceánicas, influencias hidrográficas, entre otras, que cumplen un rol importante en su comportamiento (Calero, Carta y Padrón, 2006).

La amplitud de la marea es amplificada y se propaga hacia las regiones costeras, como consecuencia de la conservación del flujo de energía de la onda de marea que experimenta

asomeramiento (Gallegos y Czintron, 1997; Knauss, 1978), y es incrementada según la extensión y profundidad de la plataforma continental sobre la cual se propaga (Lizano, 2006). Asimismo, el aumento puede deberse a configuraciones geomorfológicas de la costa (cuerpos de agua semi-cerrados: golfos, bahías), fricción o efectos de refracción, reflexión o resonancia en el trascurso de la propagación de la onda (Forrester, 1983). En la Costa Caribe Colombiana se experimenta un rango mareal, del orden de los centímetros notándose una permanencia de vientos alisios y bajas presiones atmosféricas que podrían generar las llamadas mareas meteorológicas (Kjerfve, 1981; Pugh, 1996; Torres y Tsimplis, 2013; Torres-Parra, Sánchez y Moreno-Calderón, 2017), que afectan el nivel del mar, en este caso, aumentando la altura de la onda de marea y por ende, convirtiéndose igualmente en un factor de amenaza en las poblaciones costeras ante un posible evento de tsunami.

Debido a la extensión y a las condiciones geomorfológicas, sociales, entre otras; propias del Caribe colombiano, se cuenta con información

del nivel de mar limitada tanto temporal como espacialmente, es por ello que se adopta la metodología desarrollada en el CCCP (Otero, 2005), para determinar las cotas máximas de inundación cuando no se cuenta con registros instrumentales, con el fin de obtener de forma probabilística, un estimado del comportamiento del nivel del mar de estas áreas. La metodología empleada para la obtención de los resultados, tiene como base el análisis de la marea meteorológica empleando métodos indirectos basados en técnicas de Montecarlo debido al carácter aleatorio de la misma.

Basados en los trabajos realizados en los Centro de Investigación de Dimar, se extrae el régimen medio del nivel del mar (Figura 6) obtenido para la población de Cartagena en el Caribe colombiano (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe - CIOH, 2009), a partir del cual se obtienen los niveles de marea alta y baja (debido a que su variación mareal es muy pequeña) (Tabla 5), los cuales son sumados a las mallas de detalle y con ello se evalúa el grado de inundación en la zona de estudio.

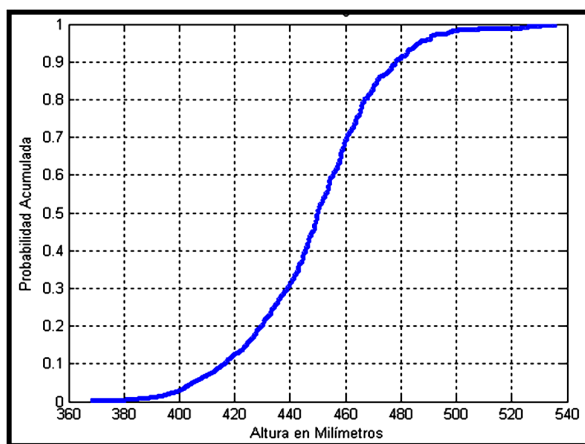


Figura 6. Régimen medio determinado para Cartagena de Indias. [Modificado por el autor]

Tabla 5. Nivel de marea para Cartagena de Indias.

Zona de interés	Nivel Marea Alta [msnm]	Nivel Marea Baja [msnm]
Cartagena	0.48 metros	0.43 metros

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante el uso del modelo numérico de tsunamis COMCOT V1.7, se realizó la generación, propagación e inundación de los escenarios sísmicos definidos anteriormente a partir de un método determinista (Tabla 3 y Tabla 4). La inundación se calculó sobre la malla de mayor resolución (30 metros), dándole al modelo un tiempo de 6 horas para simular el evento en cada una de las fuentes.

La deformación inicial del lecho marino generada por cada uno de los escenarios sísmicos (Figura 7), muestra que las fuentes más cercanas a la población en cuestión son la de Panamá y Caribe Wave; asimismo, se puede inferir que la fuente que provoca una mayor área de ruptura, debido a los parámetros focales de la falla, es el escenario de Caribe Wave, el cual genera una elevación del fondo marino de aproximadamente 5 metros en la zona de ruptura.

Una vez se genera la deformación en el lecho marino, esta desplaza la columna de agua que se encuentra justamente encima de la zona de ruptura, dando origen a ondas largas de tsunami que se propagan desde aguas profundas y al llegar a la costa, pueden provocar inundación en la población en cuestión, tal como se muestra a continuación:

Escenario sísmico Enriquillo

El escenario de inundación (Figura 8), generado una vez ocurre un sismo con epicentro en la fuente de Enriquillo, provoca un desplazamiento en la superficie libre de aproximadamente 0.7 m, que impacta principalmente en el sector de Bocagrande, y una parte sobre el costado oeste de Tierrabomba, logrando atenuar prácticamente toda la onda ya que en la bahía interna de Cartagena, el incremento en el nivel del mar es casi nulo. La primera onda en arribar, tiene una altura de 10 cm en 19 minutos; sin embargo, 10 minutos después llega otra ola con una amplitud de 17 cm, lo cual constata que un evento de este tipo genera un tren de ondas y no necesariamente la primera en llegar, es la de mayor altura.

Escenario sísmico Caribe Wave

Este escenario sísmico, al ser uno de los que mayor cercanía tiene con la población bajo estudio,

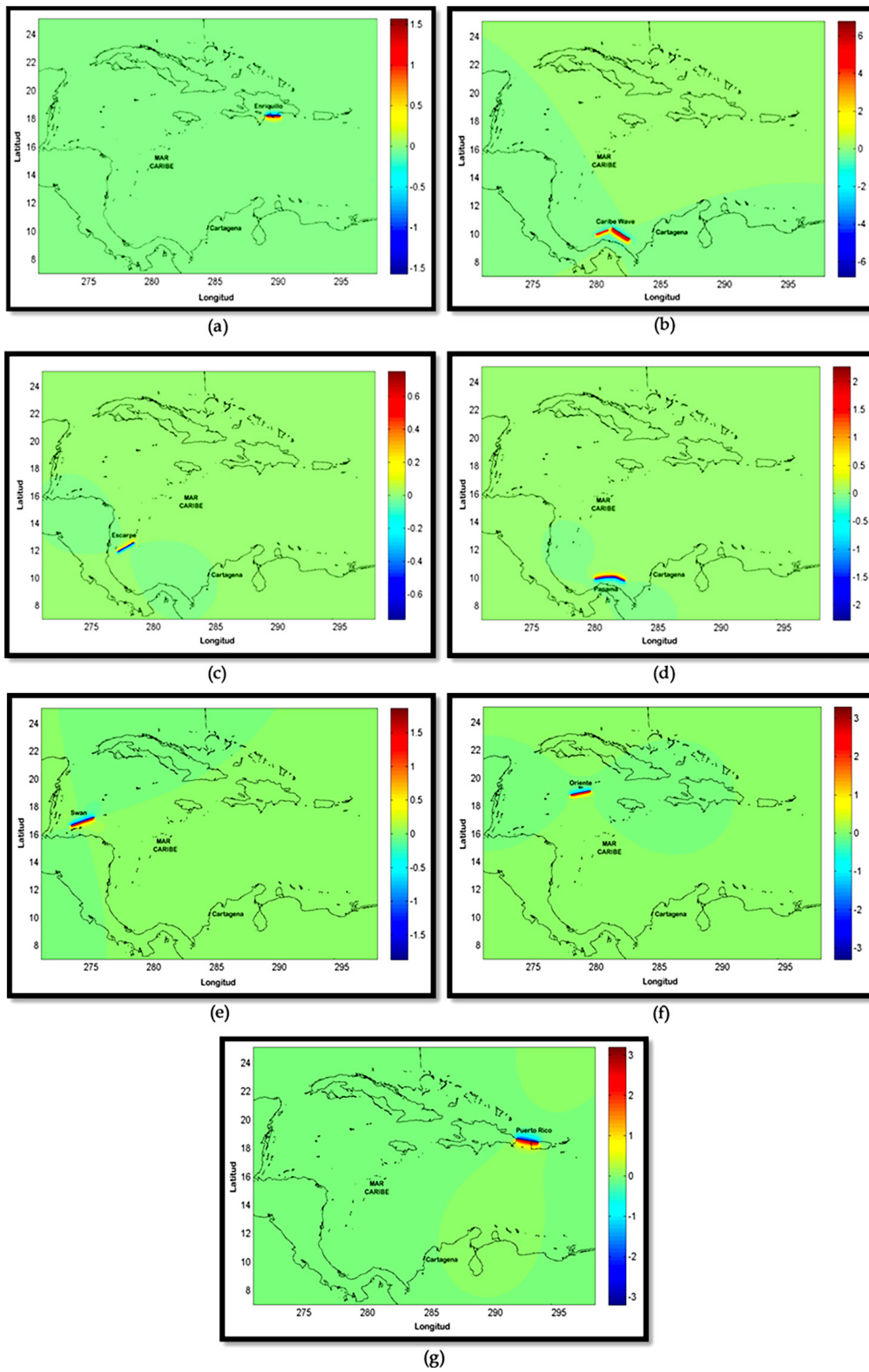


Figura 7. Deformación inicial del lecho marino. (a) Enriquillo, (b) Caribe Wave, (c) Escarpe, (d) Panamá, (e) Swan, (f) Oriente, (g) Puerto Rico.

y debido a los parámetros focales propios del escenario, es que el que mayor inundación genera sobre la población de Cartagena (Figura 9), pues en la salida gráfica se observa que impactan olas que van desde 3 m en Bocagrande, hasta casi los 4 m, en Tierrabomba. Estas olas generan una lámina de agua inundante de 3 m, en las zonas más bajas como los son: Bocagrande, Marbella y la Boquilla. Caso contrario ocurre en la bahía interna de Cartagena, donde el incremento en el nivel del mar es menor a 1 m, gracias a la disminución en la energía y amplitud de la onda que impacta directamente sobre la isla

Tierrabomba, sirviendo como una barrera natural que ayuda considerablemente a proteger esta zona.

El tren de olas que arriba a Cartagena en un estado de marea alta, tiene alturas de 1.4 m, 1.1m y 51 cm respectivamente, con tiempos de llegada de 34 min, 82 min y 121 min. Esto implica que la primera onda sería la que causaría una mayor afectación en la población, y contarían con no más de media hora para evacuar a zonas de menor exposición, de forma segura.

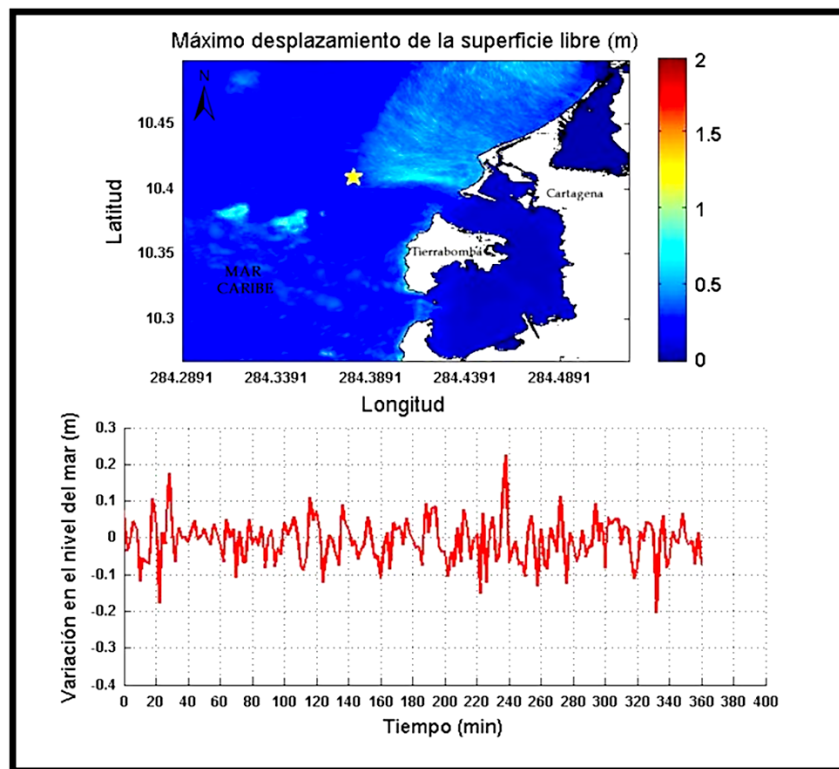


Figura 8. Resultado de escenario generador de tsunami de origen regional ubicado en Enriquillo, con magnitud Mw 7.7 para la población de Cartagena. La estrella corresponde a la ubicación del mareógrafo sintético.

Escenario sísmico Escarpe

Una vez ocurre un evento cuyo epicentro se encuentra en Escarpe, genera ondas de tsunami que impactan principalmente sobre el sector de Bocagrande (Figura 10), con una amplitud de aproximadamente 20 cm en marea alta, los cuales no generan una gran afectación sobre las zonas más bajas, ni en la bahía interna de

Cartagena, donde el incremento es casi de 10 cm. Según el mareograma sintético, el tiempo de arribo de la primera ola está próximo a los 74 minutos; sin embargo, no es la onda con mayor amplitud, pues 8 minutos después, llega una onda con una altura cerca a los 4 cm, esto implica que un evento como este, no tendría mayores consecuencias sobre la población bajo estudio.

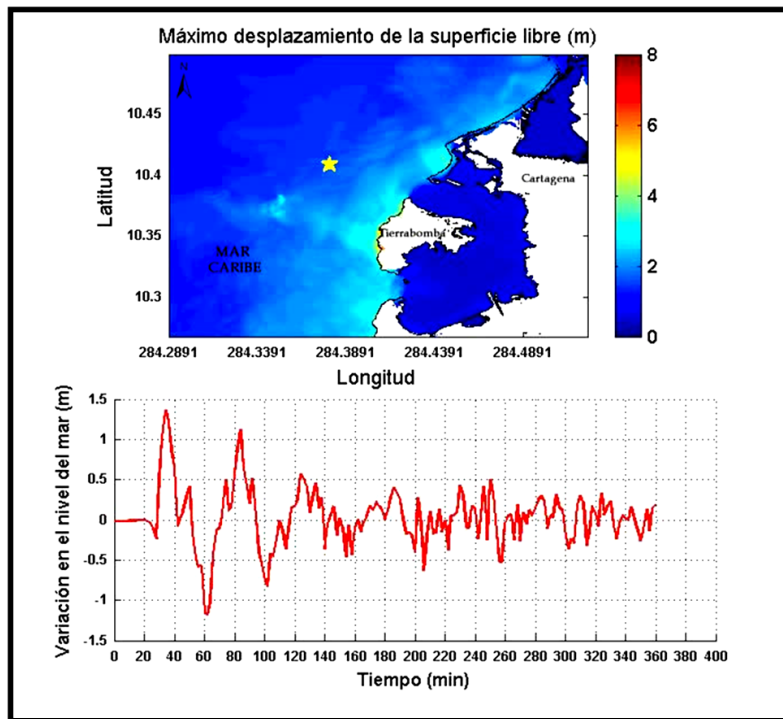


Figura 9. Resultado de escenario generador de tsunami de origen regional ubicado en Caribe Wave, con magnitud Mw 8.5 (total para los dos segmentos) para la población de Cartagena.

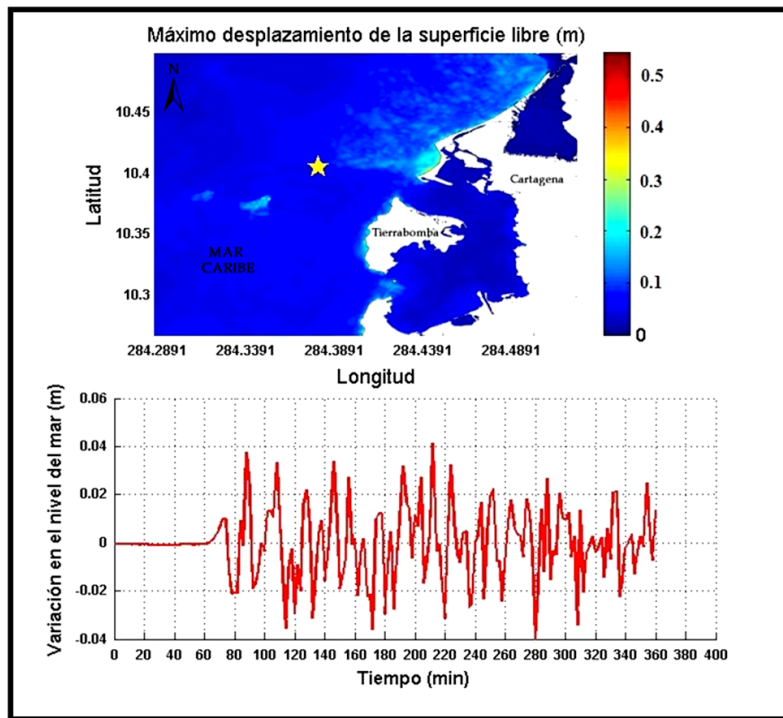


Figura 10. Resultado de escenario generador de tsunami de origen regional ubicado en Escarpe, con magnitud Mw 5.8 para la población de Cartagena.

Escenario sísmico Panamá

Este escenario sísmico, a pesar de que se encuentra relativamente cerca de la ciudad de Cartagena, debido a las características propias del evento y a los parámetros focales, no causa los mismos efectos que el Caribe Wave, pues el escenario de inundación (Figura 11), en un estado de marea alta, muestra que impactan ondas principalmente en el sector costero de

Bocagrande, Marbella y la Boquilla, ondas con una amplitud que asciende hasta casi 1 metro, causando inundaciones que no superan los 50 cm en las zonas más bajas, siendo más evidente en La Boquilla. A partir de la señal sintética registrada en el punto de interés, se puede inferir que el tiempo de llegada de la primera ola es de 30 minutos con una altura de 15 cm, siendo esta la de mayor amplitud del tren de olas que llega a la costa de Cartagena.

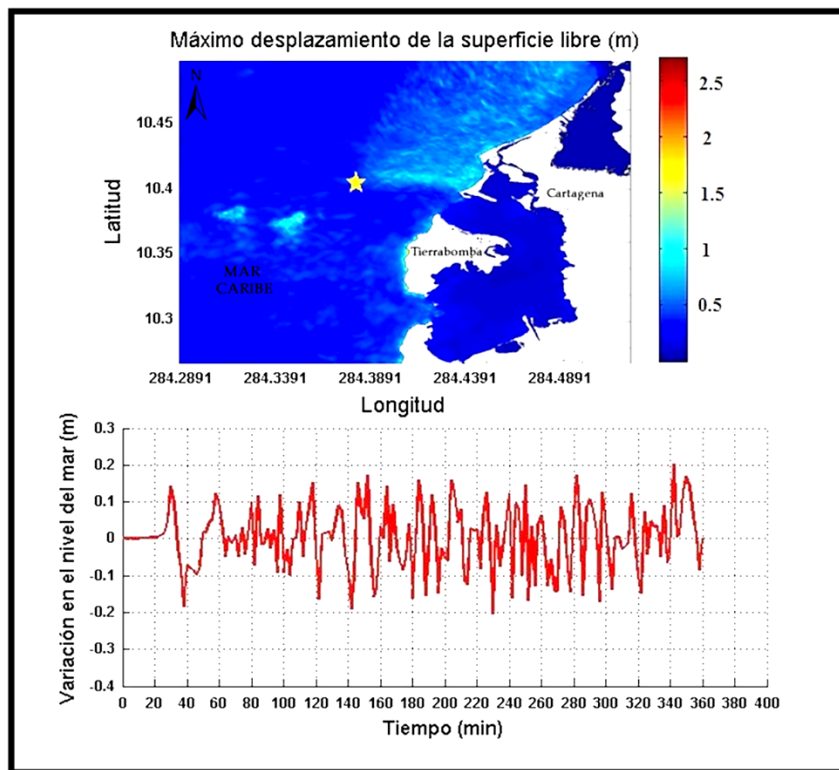


Figura 11. Resultado de escenario generador de tsunami de origen regional ubicado en Panamá, con magnitud Mw 7.9 para la población de Cartagena.

Escenario sísmico Swan

La inundación generada por el escenario sísmico Swan (Figura 12), en un estado de marea alta, muestra que al igual que los anteriores escenarios, la zona de mayor impacto es el sector de Bocagrande, el cual recibe olas que se propagan desde el epicentro del sismo hasta la costa y llegan con una

amplitud de aproximadamente 15 cm, sin generar una lámina de agua inundante de consideración. En la bahía interna, de igual forma no sufren una afectación importante, ya que el nivel de mar se incrementa unos pocos centímetros que no afectan a la población. De la señal sintética se infiere que esta onda llega en 3.8 horas aproximadamente con una altura casi imperceptible de 3 cm.

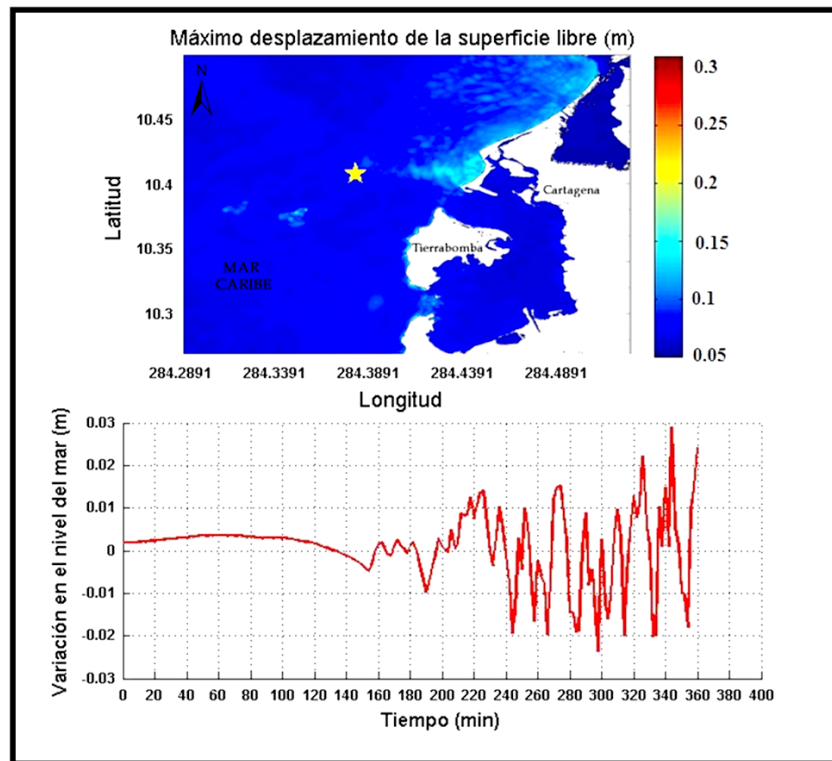


Figura 12. Resultado de escenario generador de tsunami de origen regional ubicado en Swan, con magnitud Mw 7.3 para la población de Cartagena.

Escenario sísmico Oriente

En la inundación generada por el escenario sísmico ubicado en Oriente (Figura 13), se puede observar que con un estado de marea alta, el mayor impacto lo recibe la zona de Bocagrande, con alturas que van desde los 30 cm hasta 40 cm. Esta elevación de la superficie, genera inundaciones mínimas de aproximadamente 10 cm en la parte norte de Cartagena. Lo anterior implica que el evento con estas características, no generaría daños de consideración sobre la ciudad de Cartagena, pues debido a la lejanía y a las condiciones del fondo, la onda se dispersa y disminuye su amplitud a tal punto que la fracción que llega a las playas cartageneras no es de gran importancia.

El mareograma sintético, indica que el tiempo de arribo de la primera onda al punto de control, se da en aproximadamente 2 horas con una altura de ola cercana a los 5 cm; sin embargo, una hora después, llega una onda con una amplitud cercana a los 10 cm, lo cual confirma que en un

evento tsunamigénico no siempre la primera ola es la más grande.

Escenario sísmico Puerto Rico

Una vez ocurrido un sismo como el representado por el escenario de Puerto Rico, genera ondas que impactan directamente sobre las playas de Bocagrande, Marbella y La Boquilla, con una sobrelevación de la superficie que asciende aproximadamente a los 75 cm, generando inundaciones de 50 cm principalmente en las zonas más bajas de la parte norte de Cartagena (Figura 14).

En cuanto a la bahía interna, el incremento es de casi 30 cm, debido a la reducción que presenta la onda al impactar sobre la isla barrera de Tierrabomba. Se aprecia de la señal sintética, que la primera onda llega en 2.13 horas, pero la onda de mayor amplitud llega 2 horas después con un altura de 12 cm.

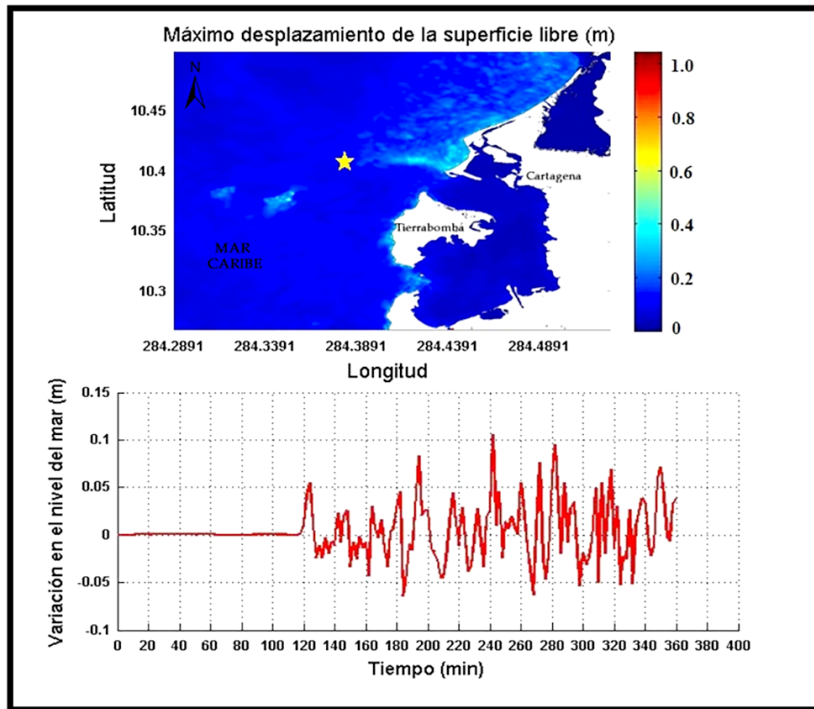


Figura 13. Resultado de escenario generador de tsunami de origen regional ubicado en Oriente, con magnitud Mw 7.1 para la población de Cartagena.

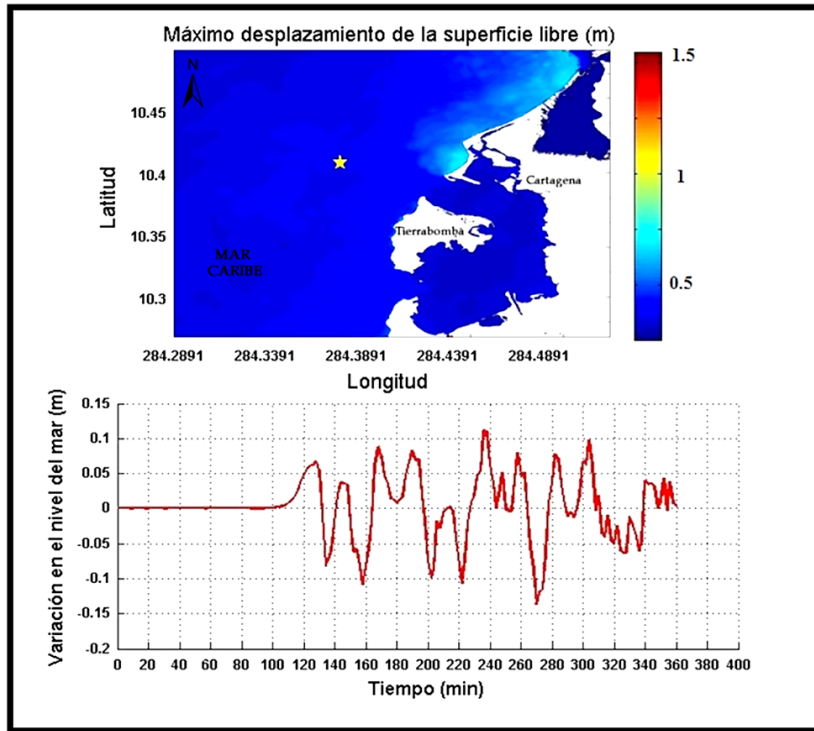


Figura 14. Resultado de escenario generador de tsunami de origen regional ubicado en Puerto Rico, con magnitud Mw 7.5 para la población de Cartagena.

CONCLUSIONES

El escenario que presenta mayor afectación sobre la ciudad de Cartagena, es el escenario sísmico representado en el ejercicio CARIBEWAVE/LANTEX 15, generando olas de hasta 5 m aproximadamente, las cuales impactan en la isla de Tierrabomba, que a su vez representa una barrera natural para la bahía interna de Cartagena. Sin embargo, en la parte norte, se generan inundaciones de hasta 3 metros en el sector de Bocagrande, y las zonas bajas de Marbella y La Boquilla.

En conclusión las zonas más afectadas por todos los escenarios de acuerdo con su formación geológica, a la batimetría de la zona y a la dirección de propagación de los eventos, es el sector de las playas de Bocagrande, Marbella y La Boquilla; pues todos los eventos impactan principalmente sobre estas zonas. Por otro lado, la Isla de Tierrabomba, realiza un papel importante de protección sobre gran parte de la ciudad, pues al ser la primera en recibir el impacto del tren de ondas generado, es la que atenúa y absorbe en mayor cantidad la energía proveniente del *tsunami*, haciendo que la amplitud de onda disminuya hasta un 70 % al llegar a la ciudad de Cartagena.

REFERENCIAS

- Álvarez, L., Rubio, M., Chuy, T. y Cotilla, M. (1985). *Estudio de la sismicidad de la región del Caribe y estimación preliminar de la peligrosidad sísmica en Cuba*. Archivo del Departamento de Sismología, Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba.
- Calero, R., Carta, J. y Padrón, J. (2006). Energía: Programa educativo eficiencia energética. In: *Curso de formación para profesores* (pp. 555-558). Gran Canaria.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe - CIOH. (2009). Informe técnico de delimitación de playas, determinaciones previas de jurisdicción, vector de línea de más alta marea y franja de 50 metros de jurisdicción en el sector comprendido entre Punta de Piedra (Dpto. de Bolívar) y la población de Santa Ana (Barú). Cartagena, Colombia.
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres -CONRED. (2015). Boletín informativo No. 3995 - Monitoreo en el Caribe por posible tsunami de origen volcánico. Guatemala. Recuperado de http://conred.gob.gt/www/index.php?option=com_content&view=article&id=5542&catid=37&Itemid=1010.
- Cornell University School of Civil and Environmental Engineering. (2015). Research projects - COMCOT. New York, EU. Recuperado de http://www.cee.cornell.edu/research/groups/phil_liu/research-projects.cfm
- Correa, R. (2013). *Evaluación de la Peligrosidad debido al Impacto de tsunamis de origen tectónico en el litoral y área Insular del Caribe colombiano (Tesis de maestría)*. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Pags.
- Cotilla, M. y Udías A. (1999). Geodinámica del límite Caribe-Norteamérica. *Revista de la sociedad geológica de España*, 12 (2), 175-186.
- DANE. (2015). La población proyectada de Colombia es: - *Archivo de estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020*. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.dane.gov.co/reloj/>
- Fernández, M. (2002). Daños, efectos y amenaza de tsunami en América Central. *Revista Geológica de América Central*, 26, 71-83.
- Forrester, W. D. (1983). *Canadian Tidal Manual*. Department of Fisheries and Oceans, Canadian Hydrographic Service, Ottawa, Ont, 183.
- Gallegos, A., y Czintron, S. (1997). Aspectos de la Oceanografía Física Regional del Mar Caribe. In *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, 225-242. México D.F.
- Harbitz, C. B., Glimsdal, S., Bazin, S., Zamora, N., Løvholt, F., Bungum, H., Smebye, H., Gauer, P. y Kjekstad, O. (2012). Tsunami hazard in the Caribbean: Regional exposure derived from credible worst case sce-

- narios. *ELSEVIER*, 38, 1–23. doi:10.1016/j.csr.2012.02.006
- Intergovernmental Oceanographic Commission. (2015). EXERCISE CARIBE WAVE/LANTEX 15 A Caribbean and Northwestern Atlantic Tsunami Warning Exercise, 1, 109.
- Kanamori, H., y Anderson, D. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Boletín of the Seismological Society of America*, 65, 1073-1095.
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C5), 4243–4247. doi:10.1029/JC086iC05p04243
- Knauss, J. A. (1978). Introduction to Physical Oceanography. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, Inc. 18a ed.
- Lander, J. F., Whiteside, L. S., y Lockridge, P. A. (2002). A brief history of tsunamis in the Caribbean Sea. *Science of Tsunami Hazards*, 20(1), 57-94.
- Lizano, O. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*, 24(1), 51-64.
- NOAA. (2015). Natural hazard viewer -Maps. Recuperado de <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/hazards/?layers=0>
- O’Loughlin, K., y Lander, J. (2003). Caribbean tsunamis: a 500-year history from 1498-1998. *Springer*, 20pp.
- Otero, L. (2005). *Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas (bahías, estuarios, etc) cuando no se tienen registros instrumentales*. San Andrés de Tumaco, Colombia. Editor y pags
- Papazachos, B. C., Scordilis, E. M., Panagiotopoulos, D. G., Papazachos, C. B., y Karakaisis, G. F. (2004). Global relations between seismic fault parameters. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, XXXVI(April), 1482-1489.
- Pugh, D. T. (1996). *Tides, surges and mean sea-level (reprinted with corrections)*. *Marine and Petroleum Geology* (Vol. 5). Swindon, UK. doi:10.1016/0264-8172(88)90013-X
- Red Sísmica de Puerto Rico. (2015). CARIBE WAVE. Puerto Rico, Mayaguez. Recuperado de <https://wordpress.uprm.edu/caribewave/>
- Rousseeuw, P. J., y Leroy, A. M. (1987). *Robust Regression and Outlier Detection*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley y Sons, Inc. pags. doi:10.1002/0471725382.
- Torres-Parra R. R., Sánchez-Reyes D. M. y Moreno-Calderón M. Y. (2017). Variación estacional del nivel del mar en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Mar Caribe. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, Vol. 52, No. 2: 343-352.
- Torres-Parra R. R., y Tsimplis M. N. (2013). Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*. 118: 2934-2947.
- Valls, P., y Josep, M. (2009). La medición del nivel medio del mar: principios y métodos, revista, 6-10.
- Von Hillebrandt-Andrade, C. (2010). *Inter-institutional and Intergovernmental Arrangements: MIDAS and the Caribbean Tsunami Warning System*. *Geophysical Hazards and Plate Boundary Processes in Central America, Mexico and the Caribbean*.
- Wang, X. (2009). User manual for COMCOT version 1.7 (first draft). *Cornel University*, 7pgs.
- Wells, D. L., y Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.