

MODELACIÓN DE OCURRENCIAS DE FENÓMENOS TSUNAMIGÉNICOS EN LA BAHÍA DE OCOA Y MAPAS DE PELIGRO

Benjamín Huerta Garnica⁽¹⁾, Octavio Hinojoza Gabriel⁽¹⁾, Mario Salgado Gálvez⁽²⁾ Vladimir Enrique Guzmán Javier⁽³⁾, Gregorio Rosario Michel⁽³⁾

¹ ERN - Evaluación de Riesgos Naturales. Vito Alessio Robles No.179, CDMX, 01050, benjamin_huerta@ern.com.mx,
octavio.hinojoza@ern.com.mx

² CIMNE. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, mario.sal.gal@gmail.com

³ SGN - Servicio Geológico Nacional, Ave. Winston Churchill No.75, Santo Domingo, R. D., vguzman@sgn.gob.do,
gmiche12@uasd.edu.do

X. Riesgo estructural ante otros eventos extremos y megadesastres

RESUMEN

La Bahía de Ocoa está localizada al sur de República Dominicana y se encuentra expuesta a la ocurrencia de eventos sísmicos generadores de tsunami. Este estudio nos permite identificar el peligro de inundación por tsunami mediante el análisis de las fuentes sísmicas, la obtención de los diferentes parámetros que alimentan el modelo de propagación y la modelación de los posibles eventos que produzcan afectación en la zona.

Para este estudio se realizó un modelo de peligro sísmico con la herramienta R-CRISIS, donde se incluyó la información del catálogo histórico y los estudios de geometría de las placas tectónicas. Con este modelo fue posible generar un catálogo estocástico de eventos con datos de su localización, magnitud y geometría de las rupturas con lo que fue posible determinar cuáles eventos tienen potencial de ocasionar tsunami, asignando la misma frecuencia anual del evento sísmico que lo genera.

Se calculó la deformación vertical del fondo marino, utilizando la metodología propuesta por Okada en 1985. Una vez obtenida esta deformación, se modela la propagación del tsunami empleando el modelo Geoclaw que es ampliamente aplicado para estos fines. Se utilizan datos detallados de batimetría y topografía, con lo cual se calcula la altura de ola máxima en puntos predeterminados sobre la línea de costa, para posteriormente calcular la altura de inundación tierra adentro en zonas de interés.

A pesar de que la zona de estudio es de baja actividad ante estos fenómenos, este ejercicio nos permite establecer bases sólidas para la obtención del peligro, lo que permitirá a las autoridades de protección civil y a las dependencias encargadas del desarrollo urbano, identificar las regiones de posible afectación a fin de gestionar su crecimiento demográfico e informar a la población existente de las medidas que deben tomar para atender la emergencia y así mitigar sus efectos.



1 CARACTERIZACIÓN SISMOGÉNICA

El entorno sísmo-tectónico de la República Dominicana, localizada en el extremo oriental de la Isla de La Española, es controlado principalmente por la interacción entre las placas Norte América y el Caribe. En la interfaz de estas dos placas se genera un complejo sistema tectónico con un gran número de fallas que crea una franja sísmicamente activa a lo largo del límite de placa; hacia el oeste de la isla las fallas Enriquillo-Plantain Garden y Septentrional, ambas con orientación E-W, absorben el componente transcurrente del movimiento relativo de las placas, por otro lado, hacia el oriente, se encuentran zonas de subducción en el norte y sudeste de la isla (subducción Norte Hispaniola y Fosa de los Muertos). Esta última, la de la Fosa de los Muertos es la que resulta de interés para el presente estudio al ser la zona de subducción con influencia en la zona de la Bahía de Ocoa. La Figura 1 muestra los principales sistemas de fallamiento para La Española y con un círculo azul se muestra el área de estudio.

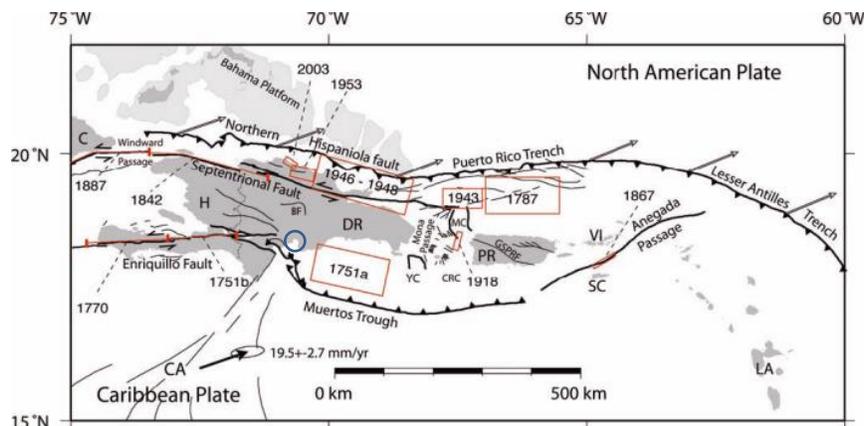


Figura 1. Sistemas de fallamiento en La Española (Tomado de: Maneker et al. (2008)), en círculo azul se resalta la zona de la Bahía de Ocoa

El enfoque utilizado para la evaluación probabilista del peligro sísmico está basado en la propuesta clásica de Esteva (1967) y Cornell (1968), en la cual la zona bajo estudio se divide en una serie de provincias, donde cada una de ellas se asume con características sísmo-tectónicas similares.

1.1 Catálogo de terremotos

El catálogo histórico para este estudio contiene información de diferentes fuentes internacionales, como la v7.0 del catálogo instrumental global ISC-GEM (Storchak *et al.*, 2013) y el USGS-NEIC. Para fines de validación y verificación de eventos particulares, se utilizaron otras fuentes de datos (por ejemplo, Engdahl y Villaseñor, 2002). El catálogo de trabajo solo tiene en cuenta la sismicidad instrumental y cubre el período entre el 1 de enero de 1900 al 31 de diciembre de 2019, con una magnitud umbral igual a $M_w \geq 4.0$. Adicionalmente, se realizó una revisión cuidadosa del catálogo suministrado por el Servicio Geológico Nacional (SGN) de la República Dominicana, que además incluye diferentes fuentes de información asociada a proyectos sísmicos en el país y la región, para revisar que todos los eventos con $M_w \geq 4.5$ incluidos en este, estuviesen también reportados en las

fuentes de información anteriormente mencionadas. No hubo necesidad de incluir ningún terremoto adicional tras este chequeo.

Aunque para la región existen registros históricos desde 1520, debido a las incertidumbres asociadas a su magnitud, localización y magnitud, para la estimación de los parámetros de sismicidad (parámetros a y b) de las fuentes sísmicas, solo se consideraron los terremotos registrados a partir de 1900. Sin embargo, vale la pena señalar que toda la información sísmica (tanto histórica como instrumental) para el área de estudio ha sido revisada y se tomó en cuenta, entre otras cosas, como indicador para la asignación de los valores de la magnitud última (M_U) a todas las fuentes sísmicas modeladas.

1.2 Fuentes sísmogénicas

La geometría y las características del proceso de subducción se dedujeron, cuando fue posible, a partir del conjunto de datos Slab v2 (Hayes *et al.*, 2018) que contiene, entre otra información, una serie de curvas de nivel que dan cuenta de la variación en profundidad de los procesos de subducción y valores típicos de la orientación de las rupturas, entre otros de la región, aunque no tiene el detalle para la zona de la Fosa de los Muertos. Debido a ello, se utilizaron las secciones transversales incluidas en el trabajo de Rodríguez-Zurrunero *et al.*, (2020) tal y como se indica en la Figura 2.

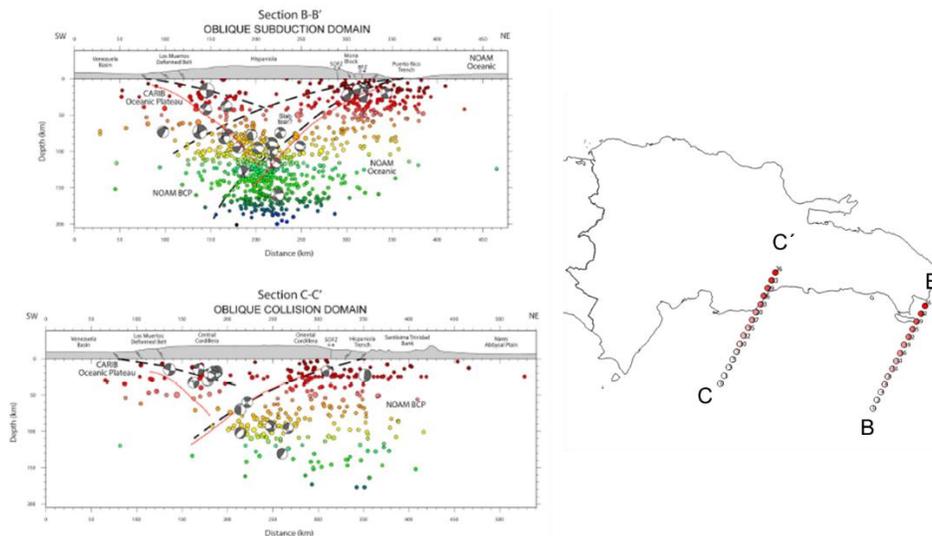


Figura 2. Izq. secciones transversales de subducción para la República Dominicana. Der. Variación en profundidad (km) de las secciones B-B y C-C de Rodríguez-Zurrunero *et al.*, (2020)

La Figura 3 muestra la geometría de las fuentes sísmicas incluidas en el proyecto de R-CRISIS para realizar la caracterización sísmogénica de las fuentes de subducción en la zona de influencia para la Bahía de Ocoa. En total se han identificado tres regiones denotadas como Fosa de los Muertos Este, Oeste y Sur que recogen la sismicidad ocurrida en las mismas.

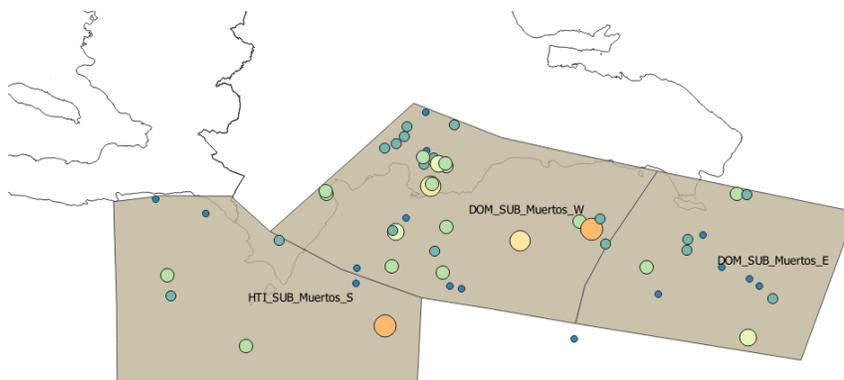


Figura 3. Geometría de las fuentes sismogénicas utilizadas en el proyecto de R-CRISIS y sismicidad asignada a cada una de ellas

1.3 Modelos de sismicidad

En este estudio se supone que la sismicidad de todas las fuentes sigue un proceso de ocurrencia de Poisson, que en pocas palabras supone una independencia en tiempo y espacio entre los eventos (razón por la cual es necesario un proceso de depuración del catálogo de trabajo). En el desarrollo de PSHA, generalmente se utilizan dos modelos de sismicidad de Poisson, que son los siguientes:

- 1) Gutenberg-Richter modificado (Cornell y VanMarcke, 1969) y,
- 2) Modelo del temblor característico (Youngs y Coppersmith, 1985)

Para cada caso se determinaron los valores de los parámetros de sismicidad utilizados en las fuentes. La Figura 4 muestra una comparación del modelo de sismicidad característico utilizado en la definición de la actividad sísmica en la Fosa de los Muertos Oeste, con el conteo de terremotos histórico, normalizado por ventanas de completéz. Puede observarse en este caso un buen ajuste, buena parte debido al número suficiente de eventos utilizado para la estimación de los parámetros de sismicidad

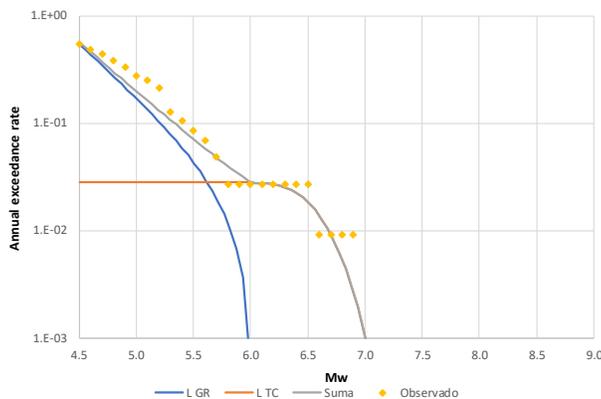


Figura 4. Validación del modelo de sismicidad para la fuente sismogénica Fosa de los Muertos Oeste



1.4 Catálogo sintético

La modelación del peligro sísmico se realizó utilizando el programa R-CRISIS V20.0 (Ordaz et al., 2020) que implementa todos los modelos geométricos y de sismicidad necesarios para este estudio. R-CRISIS es una herramienta con más de 30 años de continuos desarrollos y mejoras, y es una herramienta conocida a nivel mundial y la versión 20.0 corresponde a la última disponible.

La generación del catálogo sintético de terremotos, es el resultado de la caracterización sismogénica de las fuentes de subducción al sur de la Bahía de Ocoa que se representa en forma de un catálogo sintético de terremotos. En total, se ha generado un catálogo estocástico con 12,760 terremotos con diferentes localizaciones y magnitudes, tal y como se muestra en la Figura 5. Para una misma localización pueden existir terremotos con diferentes valores de M_w y, por consiguiente, con diferentes áreas de ruptura y frecuencias de ocurrencia.



Figura 5. Visualización gráfica del catálogo sintético de terremotos

2 SELECCIÓN DE EVENTOS TSUNAMIGENICOS

La generación de un tsunami a consecuencia de un terremoto, ocurre cuando un gran sismo con epicentro a poca profundidad, localizado bajo el fondo oceánico y produciendo una deformación vertical del terreno. Esta deformación genera, a su vez, el desplazamiento en esa dirección de la columna de agua situada sobre el terreno deformado (ver Figura 6). Se puede observar cómo ese movimiento vertical de la columna de agua se propaga como una onda de forma horizontal. Por último, en este ejemplo esquemático se muestra el efecto que produce la disminución de la profundidad del fondo oceánico, la distancia entre las crestas de las olas disminuye y la altura de la ola aumenta considerablemente, inundando zonas próximas a la costa (Juan C. N., 2015).

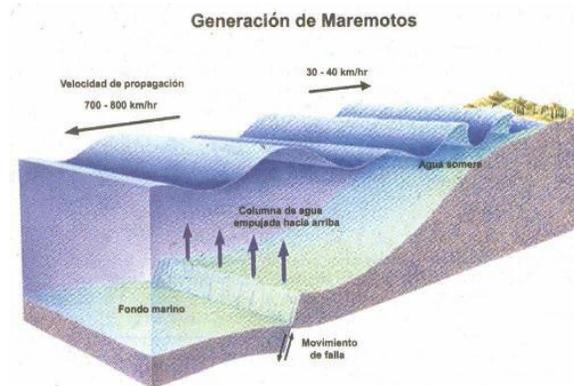


Figura 6. Física de los Tsunamis producidos por sismos

Un terremoto con las características mencionadas anteriormente (gran magnitud, bajo el agua, a poca profundidad, y que produzca una importante deformación vertical en el fondo oceánico), puede llegar a generar un ascenso del agua en torno a un metro de amplitud en un círculo de cientos de kilómetros de radio. Aunque también un terremoto con epicentro en tierra, pero a pocos kilómetros de la costa, puede generar un tsunami, siempre que produzca un desplazamiento vertical importante del fondo marino, es decir, que su área de ruptura se localice con un porcentaje importante bajo el agua.

Con base en lo expuesto con anterioridad se requieren obtener las fuentes que pueden ser tsunamigénicas de acuerdo con el modelo sísmico desarrollado, en términos más puntuales se requiere determinar las fuentes sísmicas que cumplen con las siguientes características:

1. Tipo de falla de subducción
2. Con una parte de su geometría bajo el mar a profundidades menores a 60 km
3. Que produzca sismos grandes, que M_u sea mayor o igual a 6.9 grados
4. Con una distancia cercana, que produzca sismos locales a la zona de estudio

Como se observó en la figura 3, el contexto sismo-tectónico para la región incluye estructuras de desgarre y de subducción propicias para la generación de Tsunamis, en particular por las fuentes localizadas en la falla de la Fosa de los Muertos que es muy cercana a la zona de estudio.

2.1 Análisis preliminar de eventos

Ya que las áreas de ruptura de cada terremoto se pueden calcular a partir de la relación de Singh *et al.* (1980) como función de la magnitud y las constantes K_1 y K_2 . Se realizó un análisis previo para determinar rupturas circulares. En la Figura 7 se muestra una imagen donde podemos ver las rupturas para cada fuente con una diferencia notable entre las áreas de los eventos de las dos fuentes DOM_SUB_Muertos de $M=7.12$ con relación a la fuente HTI_SUB_Muertos cuya magnitud es de 6.85, también se puede diferenciar con una escala de color azul el porcentaje de las áreas en mar (azul intenso representa porcentaje de 100% de su área en mar y el color blanco con la totalidad de su área en tierra). En la misma figura se muestra un conteo de los eventos con magnitud mayor a 6.85 en todas las fuentes y con un área en mar mayor al 50% concluyendo que la fuente DOM_SUB_Muertos_W contiene un número mayor de eventos (1,048), los eventos de las tres

fuentes con magnitud mayor a 6.85 suman en total 1,908 que representan solo el 14.95% del total de eventos estocásticos 12,760.

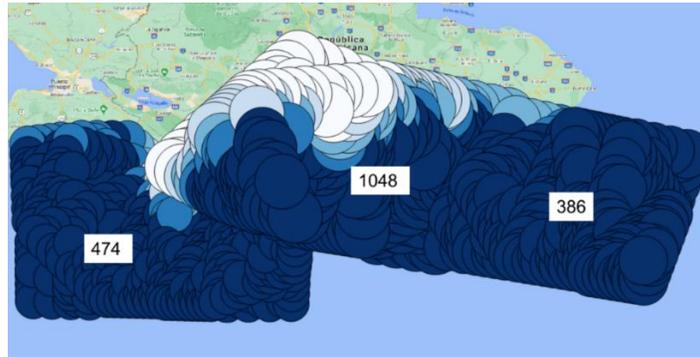


Figura 7. Área de ruptura circulares con escala de colores para el mostrar el porcentaje en mar

El número de eventos parece importante, pero se debe tomar en cuenta que cada evento contiene una frecuencia de ocurrencia, en algunos casos muy baja. Para los mapas se tendrán que considerar estos eventos, al menos los que producen alturas de ola importantes en la costa. Además, se deberán realizar agrupaciones de eventos ya que el modelo de propagación de Tsunami demanda una gran cantidad de tiempo y recursos de cómputo.

2.2 Análisis formal de eventos

En la modelación de tsunamis de origen sísmico se considera que la deformación cosísmica en dirección vertical a partir del fondo marino es igual a la perturbación inicial en el agua, con esta perturbación inicial se hace el cálculo de la propagación de la ola y finalmente de inundación. En la Figura 8 se muestran las variables de entrada del modelo (Okada, 1985), con fines de explicar este modelo de falla, en la misma figura se puede representar la Placa Oceánica que corresponde a las fuentes que subducen por debajo del territorio de República Dominicana, la Fosa de los Muertos y la falla de Enriquillo (Figura 1)

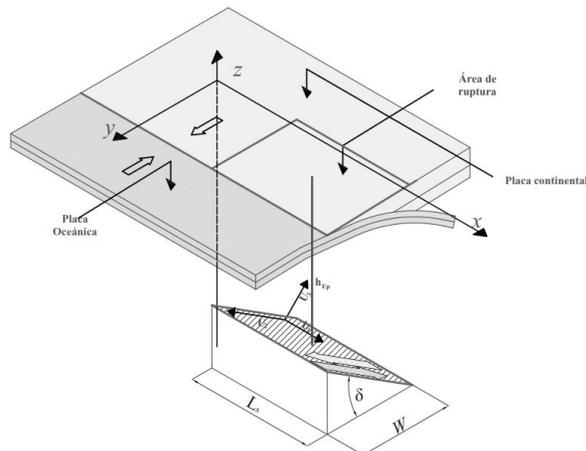


Figura 8. Variables requeridas en el modelo de Okada (1985)

- Con frecuencia existen estados constantes no triviales (tales como un océano en reposo) que se utilizan como condición inicial. Regularmente el flujo deseado o propagación de oleaje es una pequeña perturbación de dicho estado constante, como un tsunami.

El núcleo computacional de GEOCLAW está escrito en Fortran, pero se requiere una interfaz escrita en Python para simplificar el arreglo o estructura, ya sea de una ejecución simple o de una serie de ejecuciones. Las salidas del programa incluyen sobre la posición dinámicamente cambiante de mallas ajustables o sobre una posición de mallas fijas, o en otras formas tales como medidores secuenciales de profundidad contra tiempo en posiciones espaciales fijas (gauges).

3.1 Ejemplo de cálculos

En esta sección se ilustra cómo se realiza una evaluación de un caso específico, para ello se empleó una condición inicial de un evento obteniendo todos sus parámetros tal como se indicó en la sección 2 de este trabajo. Se seleccionó un evento de magnitud 7.12 en la fuente DOM_SUB_Muertos_W, donde los resultados son meramente ilustrativos para ejemplificar la metodología en curso.

Para utilizar GEOCLAW se debe proporcionar uno o más archivos que especifican la topografía del terreno en el que el flujo evoluciona. Cada conjunto de datos de la topografía especifica la coordenada z en relación con el nivel del mar, la información usada corresponde a un modelo digital de elevación obtenido por Global ASTER con resolución espacial de 30 metros. La información batimétrica es el dato principal para la ejecución del modelo GEOCLAW, estos datos se obtuvieron para aguas profundas de la página de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos.

Para los cálculos se seleccionaron 316 puntos que bordean toda la costa de la bahía en estudio, en la Figura 10 se muestra la localización de esos puntos que es donde se obtuvieron los valores de “gauge”.

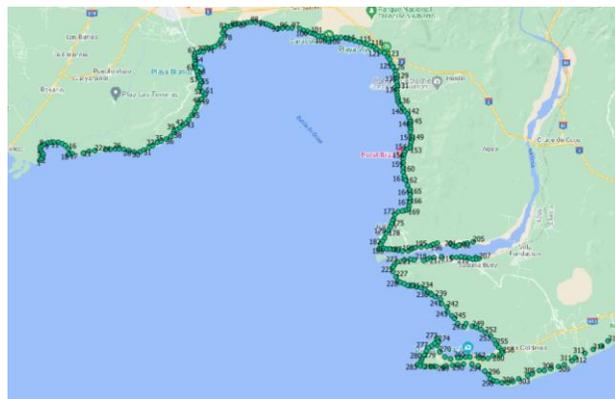


Figura 10. Zona de estudio y puntos considerados para posiciones fijas (gauge)

En la Figura 11 se muestran, solo a manera de ejemplo, los resultados en 4 puntos obtenidos con la herramienta GEOCLAW para el caso modelado. Una de las observaciones interesantes de este ejercicio, es que, los resultados entre puntos contiguos tienen muy poca variación y estas se magnifican en las regiones con cambios bruscos de la configuración de la costa, lo cual nos parece consistente con el fenómeno de tsunami.

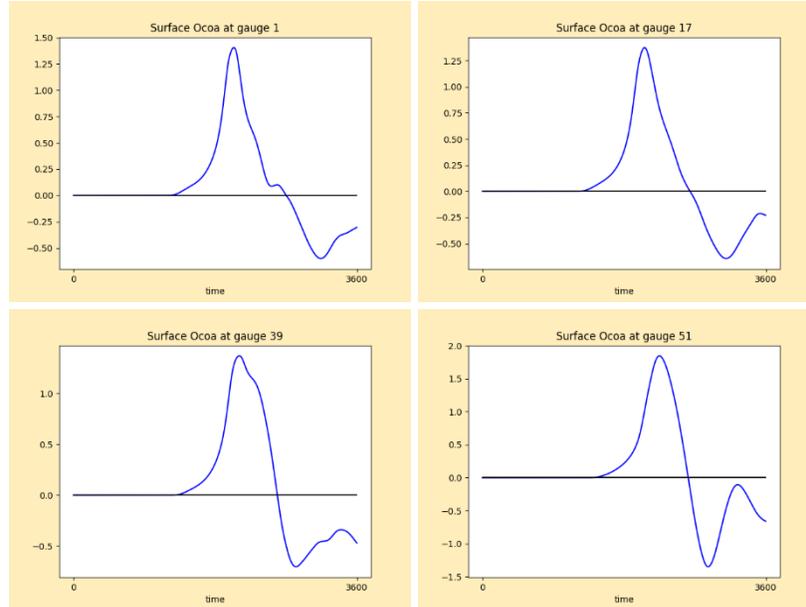


Figura 11. Cálculos de la altura de inundación en el tiempo para 4 puntos

La poca variación en la altura de ola queda de manifiesto cuando observamos la animación de la propagación de las ondas en el área de estudio, en la Figura 12 se observa el arribo de la primera onda a 0.5 horas de ocurrido el evento con un impacto total en la costa sur de República Dominicana. En esa figura se observa como las mayores alturas se presentan en las costas cuya configuración coincide con el arribo de la onda, y por ello para este evento se tiene cierta protección en la Bahía de Ocoa debido a su forma cerrada y a la refracción se produce en esas configuraciones, sin embargo, los resultados continúan siendo muy homogéneos. Estos resultados generales de propagación coinciden con la información de las alturas de ola indicadas para los puntos específicos de la figura 11.

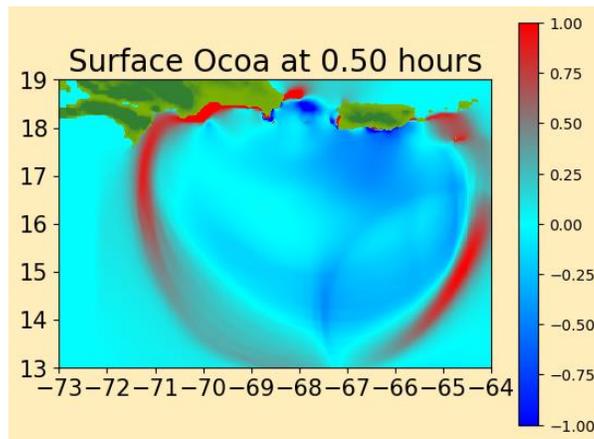


Figura 12. Área de cálculo y visualización de propagación al momento de impactar la zona de estudio

4 MAPAS DE INUNDACIÓN

Para la obtención de los mapas se aplicó la metodología usada en la elaboración de mapas de peligro y riesgo por inundaciones costeras, generadas por la marea de tormenta de los ciclones tropicales, propuestas en la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, fenómenos hidrometeorológicos de la serie Atlas Nacional de Riesgos (CENAPRED, 2014).

4.1 Asignación de periodos de retorno

Una forma de obtener los periodos de retorno para alturas de tsunami es a partir de la obtención de las tasas de excedencia de todos los cálculos de los eventos estocásticos y la consideración de sus frecuencias anuales de ocurrencia de los sismos (Jaimes *et. al.*, 2016b). En la Figura 13 se ejemplifica la obtención de esta curva la cual considera alturas de 0.1 a 3 metros, estos datos fueron asignados a los 1,908 potenciales eventos del catálogo estocástico de sismos mostrado en la figura 7.

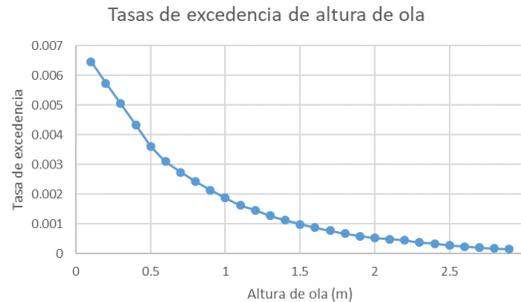


Figura 13. Tasa de excedencia obtenida con cálculos de varios escenarios y sus frecuencias

A manera de ejemplo se seleccionó uno de los casos donde de acuerdo a la información se considera con un periodo de retorno de cerca de 1000 años, es decir, una tasa de excedencia de 0.001. Para este mapa se tomó en cuenta el promedio de las alturas en los puntos de cálculo (1.5 metros) ya que como se observó con anterioridad sus variaciones no son muy grandes. En la Figura 14 se muestra en rojo las zonas de inundación de la amenaza de 1000 años de periodo de retorno, se considera que la altura de inundación es constante y solo depende de la topografía (curva de nivel de 1.5 metros), ya que para fines de simplificar los cálculos se ha omitido la componente de la velocidad del flujo.



Figura 14. Mapas de amenaza de 1000 años de periodo, acercamiento en 2 zonas diferentes

5 COMENTARIOS FINALES

La caracterización de fuentes sismogénicas en el sur de la República Dominicana nos permite identificar eventos capaces de detonar tsunamis en la Bahía de Ocoa. La obtención de un conjunto estocástico de terremotos, definido por su magnitud, localización, profundidad, área de ruptura, tamaño de ruptura, forma de ruptura, relación de aspecto, orientación, buzamiento y frecuencia de ocurrencia, nos permite contar con información suficiente para la modelación detallada del fenómeno de Tsunami.

En este trabajo se ha mostrado una forma de determinar los parámetros empleados en el modelo de Okada para nuestra área de estudio, esta información se ha aplicado a un conjunto de eventos sísmicos simulados obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a la geometría y orientación de las rupturas.

A pesar de que la Bahía de Ocoa ha experimentado poca actividad en cuanto a Tsunami, no se descarta que algunos eventos futuros ocasionen daños a esta región y esto se refuerza con la revisión de las condiciones tsunamigénicas donde las tres regiones tectónicas cumplen con las características necesarias para producir Tsunamis.

Parece un número importante de eventos estocásticos modelados para una zona con pocos eventos de tsunami, se debe tomar en cuenta que cada evento contiene una frecuencia de ocurrencia, en algunos casos muy baja. A pesar de que la zona de estudio es de baja actividad ante estos fenómenos se pudieron obtener mapas de peligro que ilustran la metodología ya que los mapas definitivos pueden ser empleados por las autoridades locales para sus planes de protección y de emergencias.

6 REFERENCIAS

CENAPRED (2014), “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riegos”, Versión Electrónica [CENAPRED \(unam.mx\)](http://cenapred.unam.mx)

Cornell, C A (1968), “Engineering seismic risk analysis”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5):1583-1606.

Cornell, C A y E H Vanmarke (1969), “The major influences on seismic risk”, in *Proceedings of the 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile.

Esteva, L (1967), “Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico”, *3er Simposio Panamericano de Estructuras*, Caracas, Venezuela.

Engdahl, E R y A Villaseñor (2002), “Global seismicity: 1900-1999”, *International handbook of earthquake Engineering and seismology*, Vol. 81A. ISBN: 0-12-440652-1.

González, F, R J LeVeque, J Varkovitzky, P Chamberlain, B Hirai y DL George (2011), “GeoClaw Results for the NTHMP Tsunami Benchmark Problems”, <http://depts.washington.edu/clawpack/links/nthmp-benchmarks/geoclaw-results.pdf>.



Hayes, G P , G L Moore, D E Portner, M Hearne, H Flamme, M Furtney y G M Smoczyk (2018), “Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model”. *Science*. 362(6410):58-61.

Jaimes, M A, E Reinoso, B Huerta y J C Rodríguez (2015), “Metodología probabilista para la obtención del riesgo de estructuras afectadas por tsunami”, *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA*, Santiago de Chile, 18-20 de Marzo.

Jaimes, M A, E Reinoso, M G Ordaz, B Huerta, R Silva, E Mendoza y J C Rodríguez (2016a), “A new approach to probabilistic earthquake-induced tsunami risk assessment”, *Revista Ocean & Coastal Management*, 119:68-75 · January.

Jaimes, M A, E Reinoso, M G Ordaz, R Silva, E Mendoza, B Huerta, G Durán, X Chávez y J C Rodríguez (2016b), “An earthquake-event-based method for mapping tsunami hazards”, *Revista Maritime Engineering*, 169(4):1-15 · November

Juan, C N (2015), “Libro: La Sorprendente Fuerza del Agua: Los Tsunamis”, *Red Sísmica Nacional Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*, Madrid España.

Manaker, DM, E Calais, A M Freed, S T Ali, P Przybylski, G Mattioli, P Jansma, C Prépetit y J B De Chabaliér (2008), “Interseismic plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean”, *Geophysical Journal International*, 174(3):889-903.

Okada, Y (1985), “Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, pp. 1135-1154

Ordaz, M G y M.A Salgado-Gálvez (2020), “R-CRISIS Validation and Verification Document”, *ERN International*, Mexico City, Mexico.

Rodríguez-Zurrunero, A, J L Granja-Bruña, A Muñoz-Martín, S Leroy, U ten Brink, J M Gorosabel-Araus, L Gómez de la Peña, M Druet y A Gorosabel-Carbó (2020), “Along-strike segmentation in the northern Caribbean plate boundary zone (Hispaniola sector): Tectonic implications”, *Tectonophysics*, 776.

Singh S K, E Bazan y L Esteva (1980), “Expected earthquake magnitude from a fault”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(3):903-914.

Storchak D A, D Di Giacomo, I Bondár, E R Engdahl, J Harris, W H K Lee, A Villaseñor y P Bormann (2013), “Public release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009)”.

Youngs R R y K Coppersmith (1985), “Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58:939-964.