

Construcción base de datos de escenarios de tsunami para el Pacífico colombiano

Construction of tsunami sceneries databases for the Colombian Pacific

DOI: 10.26640/22159045.425

Fecha de recepción: 2016-03-05 / Fecha de aceptación: 2016-06-15

Ana Melissa Guerrero* y Ronald Sánchez E.**

Guerrero, A. y Sánchez, R. (2016). *Construcción base de datos de escenarios de tsunami para el Pacífico colombiano*. Bol. Cient. CIOH (34):27-48. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.425

RESUMEN

Los tsunamis son fenómenos naturales que aunque se presentan rara vez, afectan de forma evidente las zonas costeras, produciendo inundaciones, pérdida de vidas, modificaciones geomorfológicas del lecho marino y la costa, entre otras. El Pacífico colombiano hace parte del llamado Cinturón de Fuego dentro del cual se encuentran las poblaciones de Tumaco y Buenaventura, lugares donde se centrará el estudio. Para la determinación de los parámetros macrosísmicos de cada escenario propuesto se utilizaron las aproximaciones determinista y probabilista, y la simulación de los eventos de origen cercano, regional y lejano; se realizó mediante los modelos COMCOT (evento cercano y regional) y MOST (evento lejano). Igualmente, se obtuvo una base de datos con un total de 510 escenarios de tsunami tanto para Tumaco como para Buenaventura, de los cuales es posible obtener información acerca del tiempo de llegada y la altura máxima del tren de olas de tsunami a la costa. Finalmente, se recomienda una ampliación de la base de datos, mediante una mayor densificación de escenarios de tsunami para el resto de poblaciones del Pacífico y Caribe colombiano.

PALABRAS CLAVES: tsunami, modelación numérica, base de datos, Buenaventura, Tumaco.

ABSTRACT

Tsunamis are natural phenomena that although rarely occurring, clearly affect coastal zones, causing flooding, loss of life, geomorphological modifications of the seabed and the coast, among others. The Colombian Pacific is part of the so-called Belt of Fire within which are the populations of Tumaco and Buenaventura, places where the study will be centered. For the determination of the macro-seismic parameters of each proposed scenario the deterministic and probabilistic approximations were used, and the simulation of events of near, regional and distant origin; was performed using the COMCOT (near and regional event) and MOST (distant event) models. After, a database was obtained with a total of 510 tsunami scenarios for both Tumaco and Buenaventura, from which it is possible to obtain information about the time of arrival and maximum height of the tsunami wave train to the coast. Finally, an expansion of the database is recommended, through a greater densification of tsunami scenarios for the rest of the populations of the Pacific and the Colombian Caribbean.

KEY WORDS: *Tsunami, numerical modeling, database, Buenaventura, Tumaco.*

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

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

INTRODUCCIÓN

Colombia se encuentra ubicado dentro del denominado "Cinturón de Fuego del Pacífico" y casi al borde del encuentro de dos placas tectónicas, la sudamericana y la de Nazca, creando una zona de subducción, en donde se han producido cientos de sismos (Otero, Restrepo, y González, 2014). Estos terremotos fueron asociados con generación de tsunami, causando daños severos y pérdidas de vida a los largo de la costa Pacífica colombo-ecuatoriana.

Por citar, se tiene el evento de 1979, un poderoso terremoto registrado el día miércoles 12 de diciembre, con un epicentro localizado en el océano Pacífico, a 75 kilómetros de la costa de Tumaco, el cual afectó un número significativo de habitantes en Tumaco, dejando un saldo de 450 muertos y cerca de 1000 heridos (Cardona, Toro, Vélez y Otero, 2005).

Con el fin de contrarrestar este tipo de efectos, es necesario contar con una base de datos de escenarios de tsunami que permita evaluar la inundación provocada en los centros poblados más grandes de la costa Pacífica, Tumaco y Buenaventura. Esta base de datos se elaboró para eventos de tsunami de origen cercano, regional y lejano, y brinda información acerca del tiempo de arribo de la primera ola a la costa y su máxima altura.

La bahía de Buenaventura se encuentra ubicada en el departamento del Valle del Cauca en las coordenadas 3°53'35"N 77°4'10"W. Debido a su constante dinámica de las actividades marítimas y comerciales que presenta, por ser el principal puerto del Pacífico colombiano ha inducido un aumento relevante en todas sus actividades ligadas, lo que induce un sostenimiento en la calidad de puerto competitivo para el comercio internacional, y de ahí la importancia de evaluar este tipo de amenazas en esta zona. En cuanto a Tumaco, es un municipio ubicado en el suroccidente del departamento de Nariño, su ubicación geográfica está en las coordenadas 1°48'24"N 78°45'53"W. Es el segundo puerto en importancia del Pacífico colombiano y representa un área industrial, portuaria, biodiversa y ecoturística. Según el último censo del DANE, se reporta 161 490

habitantes para la población de Tumaco y 324 207 para Buenaventura (DANE, 2015), lo que confirma que ambos representan uno de los lugares con mayor densidad poblacional del Pacífico.

El banco de escenarios se obtuvo mediante la aplicación de diferentes metodologías, la primera basada en la edición y procesamiento de toda la información topobatómica de las zonas bajo estudio y posterior creación de los dominios computacionales asociados a ella. En segundo lugar, se realizó la definición de escenarios de tsunami, mediante la aplicación de diferentes aproximaciones, la determinista para eventos de origen regional y lejano, y la aproximación probabilista para origen cercano. Por último, para la simulación de la onda de tsunami se utilizó el modelo numérico COMCOT V1.7 (por sus siglas en inglés, Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) (Wang, 2009) para eventos de origen cercano y regional y el MOST (por sus siglas en inglés, Method of Splitting Tsunami) con su interfaz gráfica, ComMIT V1.5.3 para eventos de origen lejano.

Mediante el proceso de sistematización, se realizó la carga de los escenarios simulados en la base de datos y se almacenó tanto la salida gráfica de la máxima inundación como el mareograma sintético asociado a ella. Esta información es almacenada en una herramienta computacional diseñada para la administración de escenarios precomputados, que asocia el tiempo de llegada y altura de la primera ola, resultados obtenidos de la aplicación del modelo numérico.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el sudeste de la costa Pacífica colombiana, en los departamentos de Nariño y Valle del Cauca, centros poblados de Tumaco y Buenaventura (Figura 1). El riesgo en cada una de estas poblaciones es grande debido a la alta vulnerabilidad y amenaza de origen marino existente, además si se considera el entorno socio-económico, y las condiciones estructurales de las viviendas (construcciones palafíticas), se torna en un ambiente donde se deben concentrar esfuerzos para mitigar los efectos de un tsunami.

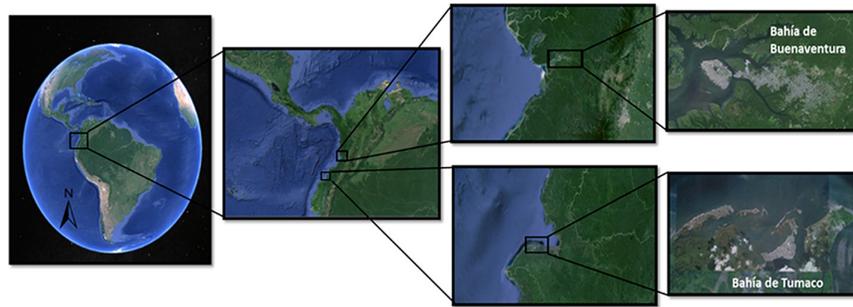


Figura 1. Área general de estudio, se muestra la población de Buenaventura y Tumaco.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada se encuentra basada en la modelación numérica de escenarios de tsunami; mediante la implementación de dos tipos de técnicas o aproximaciones, la primera es la probabilística, PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis), basada en la generación sintética de futuros escenarios de tsunami. Este análisis se realiza en tres pasos, determinación de los parámetros de la fuente del sismo y sus incertidumbres asociadas, establecimiento de sus relaciones con la propagación de tsunamis y cálculos probabilísticos. La segunda aproximación es la determinista, basada en la selección del peor escenario creíble de tsunami, el cual es generalmente seleccionado a partir de registros históricos de tsunami ocurridos en la región de estudio (Otero, 2008).

De esta manera, se creó y acondicionó una base de datos de escenarios de tsunami, la cual cuenta con información acerca de la altura y tiempo de arribo de la primera ola, y la distribución de inundación en la costa para cada una de las poblaciones bajo evaluación.

Delimitación del área de trabajo

Para la delimitación del área de trabajo, se seleccionaron las zonas con mayor densidad de información topobatemétrica con el fin de construir los dominios computacionales que serán el insumo base en los procesos de modelación numérica (Cornell University, 2015).

Los dominios o sistema de rejillas anidadas se acoplan de forma dinámica hasta cuatro regiones con diferente resolución de cuadrícula. En cada una de las regiones se puede elegir el sistema de ecuaciones que la regirá, ya sea de tipo lineal o no lineal, toda vez que para un terremoto dado, el desplazamiento del fondo marino se determina a partir de una teoría lineal de dislocación elástica (Wang, 2009).

Para evaluar amenazas de tsunami de origen cercano y regional, se empleó el modelo numérico COMCOT (Wang, 2009). El juego de mallas para las zonas evaluadas se representa por espaciamientos de 30, 90, 270 y 810 metros, respectivamente (Tabla 1), y cuyo arreglo espacial se muestra en la Figura 2.

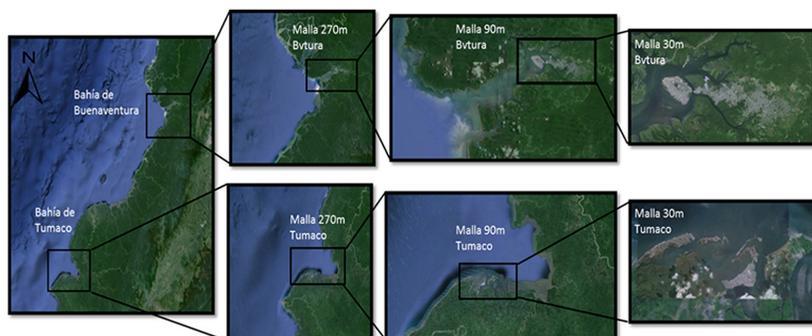


Figura 2. Arreglo de mallas computacionales correspondientes a las zonas de Tumaco y Buenaventura.

Los límites y tamaños de cada arreglo computacional se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del arreglo de mallas computacionales para las zonas bajo estudio.

Tamaño malla	Área comprendida	Límite inferior izquierdo (°)	Límite superior derecho (°)
810 m	Pacífico	-83.010; -1.492	-76.800; 6.742
270 m	Municipio de Tumaco	-79.327; 1.335	-78.247; 2.460
	Municipio de Buenaventura	-78.002; 3.223	-76.944; 3.937
90 m	Bahía de Tumaco	-79.111; 1.338	-78.241; 2.455
	Bahía de Buenaventura	-77.239; 3.775	-76.944; 3.937
30 m	Casco urbano Buenaventura	-77.090; 3.844	-76.950; 3.913

Para la evaluación de amenazas de origen lejano, se empleó el modelo numérico MOST (Method of splitting Tsunami) (Titov *et al.*, 1997) mediante la metodología ComMIT (Community Model Interface for Tsunami) (Titov *et al.*, 2011), desarrollado por Vasily V. Titov del Laboratorio Ambiental Marino del Pacífico y Costas E. Synolakis de la Universidad del Sur de California (Titov y Synolakis, 1995); actualmente, el modelo es utilizado en el Centro

para la Investigación de Tsunami (NCTR) (NOAA, 2015). La configuración del juego de mallas se estableció de la siguiente manera, la más interna presenta un espaciamiento de 30m (~1 segundo de arco), y las exteriores fueron creadas con espaciamiento de 180m (~6 segundo de arco) y 1080m (~36 segundo de arco).

Los límites de las mallas computacionales se plasman en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del arreglo de mallas computacionales para las zonas bajo estudio utilizando el modelo MOST.

Tamaño Malla	Área comprendida	Límite inferior Izquierdo (°)	Límite superior derecho (°)
1080 m	Municipio de Tumaco	-79.327; 1.335	-78.247; 2.460
	Municipio de Buenaventura	-78.002; 3.224	-76.944; 3.937
180 m	Bahía de Tumaco	-79.111; 1.338	-78.241; 2.455
	Bahía de Buenaventura	-77.239; 3.775	-76.944; 3.937
30 m	Casco urbano Buenaventura	-77.090; 3.844	-76.950; 3.913
	Casco urbano Tumaco	-78.832; 1.779	-78.711; 1.854

Definición escenario sísmico

Se definieron escenarios sísmicos precursores de tsunami, a partir de información reportada por el Servicio Geológico Colombiano (UNGRD, 2013), trabajos de Sismicidad en el Pacífico

(Sánchez y Puentes, 2012) y la aplicación de distintas técnicas de extracción de escenarios, como la aproximación probabilista y determinista (UniNorte y Dimar, 2014; Geist y Parsons, 2006).

Técnica determinista para escenarios de origen cercano

Para la definición de los peores escenarios creíbles de generación de tsunamis de origen cercano en el litoral Pacífico colombiano, se efectúa una clasificación de la zona, esencialmente en dos: *Bloque Norte* y *Bloque Sur*.

Bloque Norte

La actividad sísmica en la zona de la falla de Bahía Solano y de los segmentos asociados es reconocida, a lo largo de esta zona se registran varios eventos de magnitud importante, entre los que se destaca el sismo de 1970 (Mw. 6.5) que destruyó en un 80% el municipio de Puerto Mutis (Bahía Solano) (Taboada, Dimate y Fuenzalida, 1998). El 8 de enero de 2003 se reportaron dos (2) sismos de magnitud Mw= 5.5 y Mw= 4.8, respectivamente. El sismo principal ocurrió al sur de Bahía Solano (al occidente de Bahía Utría), sobre una falla superficial de rumbo E-W y movimiento dextral, que sería la continuación continental de una zona de cizalla que segmenta

la placa Nazca a esta latitud. La interpretación tectónica plantea que la subducción de la placa Nazca se ve frenada por colisión del bloque del Chocó con la franja continental, transmitiendo los esfuerzos (que resultan de la convergencia) a las dos placas y fracturándolas (Corporación OSSO, 2004).

La zona norte comprendida entre Cabo Corrientes y el Golfo de Cupica presenta una actividad sísmica con eventos de hasta 7.2 Mw. Aunque en la actualidad no se cuenta con registros históricos de eventos tsunamigénicos destructivos para la zona, es de importancia considerar la sismicidad presentada por la falla de Bahía Solano (Taboada, Dimate y Fuenzalida, 1998).

En la Figura 3 se presenta la ubicación de los eventos obtenidos de los catálogos Harvard CMT (The Global Centroid-Moment-Tensor) (CMT, 2015) y SISRA (Catálogo sísmico regional de América del sur) (Ceresis, 2015). Inicialmente, es posible identificar dos zonas en la región norte del Pacífico colombiano, donde se concentra la mayoría de la actividad sísmica (círculos rojos).

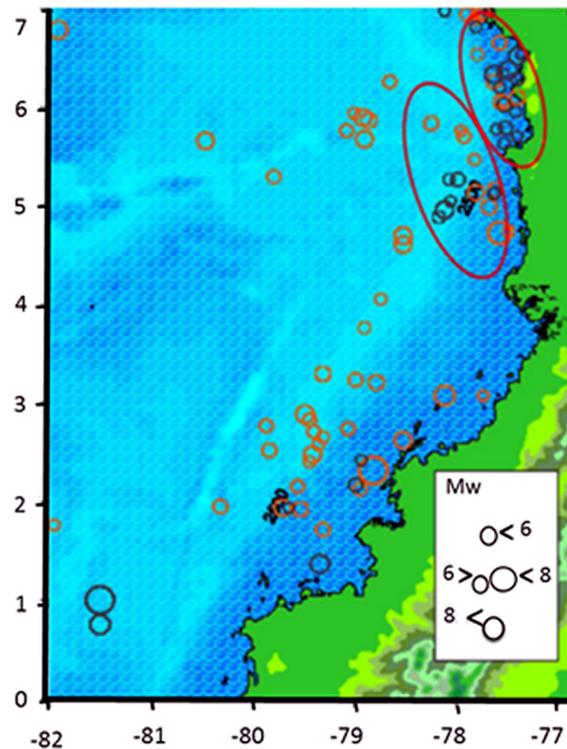


Figura 3. Sismos superficiales, de magnitud Mw > 5. Bloque Norte Pacífico colombiano. (Tomado de Kanamori y McNally, 1982).

En la Tabla 3 se presentan los eventos sísmicos del catálogo Harvard CMT por zonas.

Tabla 3. Eventos sísmicos por zonas del catálogo Harvard CMT.

Zona	Fecha	Lon (°W)	Lat (°N)	Pro (km)	Plano de falla 1			Plano de falla 1			Mw
					Str1	Dip1	Slip1	Str1	Dip1	Slip1	
I	1978/02/16	-78.24	5.84	15	249	36	-77	53	55	-100	5.6
	1988/09/20	-77.68	4.99	24.1	14	18	104	179	73	85	5.8
	1990/08/25	-77.93	5.71	35.1	350	36	79	183	54	98	5.3
	1991/12/10	-77.48	4.74	20.7	45	22	127	186	72	76	5.2
	1997/09/09	-77.82	5.47	24.1	338	28	40	211	73	112	5.1
	2002/08/08	-77.62	5.17	22.3	12	45	-140	251	63	-52	5.7
	2003/11/05	-77.81	5.14	27.6	15	38	-137	248	65	-60	5.9
	2004/11/15	-77.57	4.72	16.0	21	11	114	177	79	85	7.2
	2008/02/10	-77.95	5.76	23.7	100	72	-12	194	79	-161	5
II	1977/08/08	-77.78	6.93	15.0	287	19	25	173	82	108	5.4
	1983/01/23	-77.57	6.66	15.0	358	39	-20	104	78	-127	5.5
	1988/11/26	-77.89	6.95	21.4	316	29	-56	98	67	-107	5.4
	1990/08/25	-77.63	6.26	16.8	40	20	134	174	76	76	5.6
	1996/05/23	-77.56	6.06	15.9	349	8	82	176	82	91	5.7
	2000/07/12	-77.80	6.54	15.0	319	34	-144	167	59	-75	5.2
	2003/01/08	-77.40	6.10	25.1	299	76	172	31	82	14	5.7
	2006/01/23	-77.77	6.97	15.0	316	14	53	174	79	98	6.2
	2006/01/24	-77.73	6.96	23.7	307	29	50	170	68	110	5.4
	2006/01/29	-77.82	6.88	27.0	313	23	58	167	71	103	5.2
2007/09/22	-77.53	6.06	20.3	8	20	90	188	70	90	5.0	

Tomada de González y Otero (2010).

Por medio de la Tabla 3 se identifican aquellas fuentes desde las cuales se generaría eventos pon potencial destructivo para la zona, es así como se establecen dos fuentes generadoras de tsunamis, la primera corresponde al segmento Cabo Corrientes - Arusí y el segundo segmento, Arusí - Cabo Marzo.

La Tabla 4 presenta los parámetros de los escenarios sísmicos extremos de generación de tsunamis para el norte del Pacífico colombiano, basados en el trabajo realizado por (González y Otero, 2010).

Tabla 4. Parámetros sísmicos (Escenario Bloque Norte).

Parámetros	Cabo Corrientes - Arusí	Arusí - Cabo Marzo
Dislocación (m)	4.0	4.2
Longitud (km)	140	147
Ancho (km)	70	73
Rumbo (°)	329	349
Buzamiento (°)	11	14
Cabeceo (°)	40	53
Profundidad (km)	16	15
Magnitud (Mw)	7.92	7.96

Tomada de González y Otero (2010).

Bloque Sur

Para la definición del peor escenario sísmico creíble de generación de tsunami en el bloque sur del Pacífico colombiano, se tomaron como referencia los parámetros macrosísmicos reportados para el sismo ocurrido en 1906 en la zona de subducción colombo-ecuatoriana (Otero, Restrepo y González, 2014; Hayes, Smoczyk, Benz, Villaseñor y Furlong, 2015; Kanamori y McNally, 1982). Así, tomando un momento máximo de 8.8 Mw.; se establece un momento sísmico de 2.0×10^{22} Nm, el cual es igual al valor establecido en (Kanamori y McNally, 1982).

Los parámetros del plano de falla, como ancho y largo de la ruptura, y deslizamiento se determinaron a partir de las relaciones de escala propuestas por (Kanamori y Anderson, 1975; Papazachos, Scordilis, Panagiotopoulos, Papazachos y Karakaisis, 2004; Rousseeuw y Leroy, 1987; Wells y Coppersmith, 1994); en cuanto a los mecanismos focales, se establece un rumbo (strike) de 31° , un ángulo de buzamiento (dip) de 16° , una dirección de buzamiento (rake) de 118° ; y una profundidad de 26.6 km, reportadas por (Engdah, Van der Hilst y Buland, 1998). Finalmente, en la Tabla 5 se establece el escenario de la zona de subducción.

Tabla 5. Parámetros sísmicos (escenario zona de subducción).

Parámetros	Bloque Sur
Dislocación (m)	8.06
Longitud (km)	581
Ancho (km)	116
Strike (°)	31
Dip (°)	25
Rake (°)	129
Profundidad (km)	20
Magnitud (Mw)	8.8

Técnica determinista para escenarios de origen regional

Se realiza una revisión de la sismicidad histórica en la zona comprendida entre 4°S y 17°N de latitud y 100°W y 75°W de longitud,

con el fin de clasificar los sismos potencialmente tsunamigénicos, de esta manera se obtiene una clasificación de los sismos superficiales (profundidades hasta 50 km) y con magnitudes mayores a 6.0 Mw, que ocurrieron en esta zona (Figura 4).

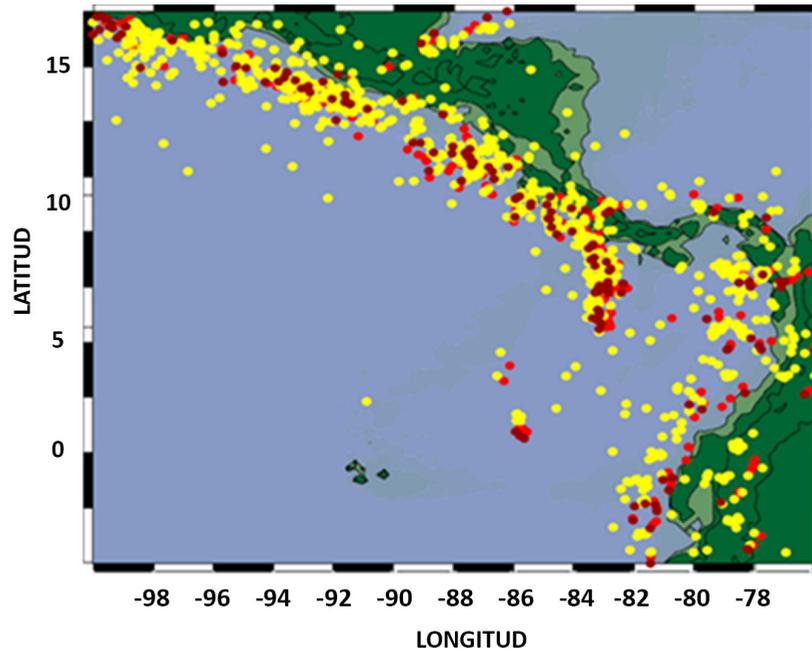


Figura 4. Sismos en el océano Pacífico para la zona de Centroamérica y Colombia. Tomado de UniNorte y Dimar (2014).

A partir de la segmentación de la zona de subducción, en (Álvarez, Gutiérrez, Aniel y González, 2012) se establecen los ángulos de rumbo (*strike*) y las máximas longitudes para los diferentes segmentos de falla. El ancho se obtiene desde la profundidad máxima de ruptura, 20 km, mientras que el ángulo de buzamiento

se selecciona teniendo en cuenta el evento de Nicaragua 1992. Además, en combinación con los datos disponibles de las fallas normales, se define un conjunto de potenciales fuentes de tsunamis (Tabla 6), donde se muestran los parámetros obtenidos para los cuatro segmentos en la zona de subducción de la fosa Mesoamericana.

Tabla 6. Peores escenarios creíbles para la fosa mesoamericana. Las tres primeras fuentes tomadas de UniNorte y Dimar (2014).

Fuente	Lon (°W)	Lat (°N)	Pro (km)	Largo (km)	Ancho (km)	Str (°)	Dip (°)	Slip (°)	Despl (m)	Mw
El Salvador	-89.53	12.50	10	260	73	292	16	90	4.0	8.1
Guatemala	-91.48	13.31	10	205	73	295	16	90	2.6	7.9
Chiapas	-93.63	14.44	10	330	73	301	16	90	5.3	8.2
Nicaragua	-87.44	10.81	10	200	73	315	16	90	2.6	7.7

Técnica determinista para escenarios de origen lejano

Un tsunami puede llegar a viajar grandes distancias y causar graves daños materiales y pérdidas de vidas humanas en zonas costeras. Debido a la estrecha relación entre los movimientos

sísmicos y los tsunamis, las principales zonas generadoras de este fenómeno coinciden con las áreas sísmicas oceánicas y costeras más activas. Con base en lo anterior, a nivel mundial se definen cuatro zonas generadoras de tsunami, (1) Pacífica, (2) Índica, (3) Atlántica, y (4) Mediterránea (Figura 5).

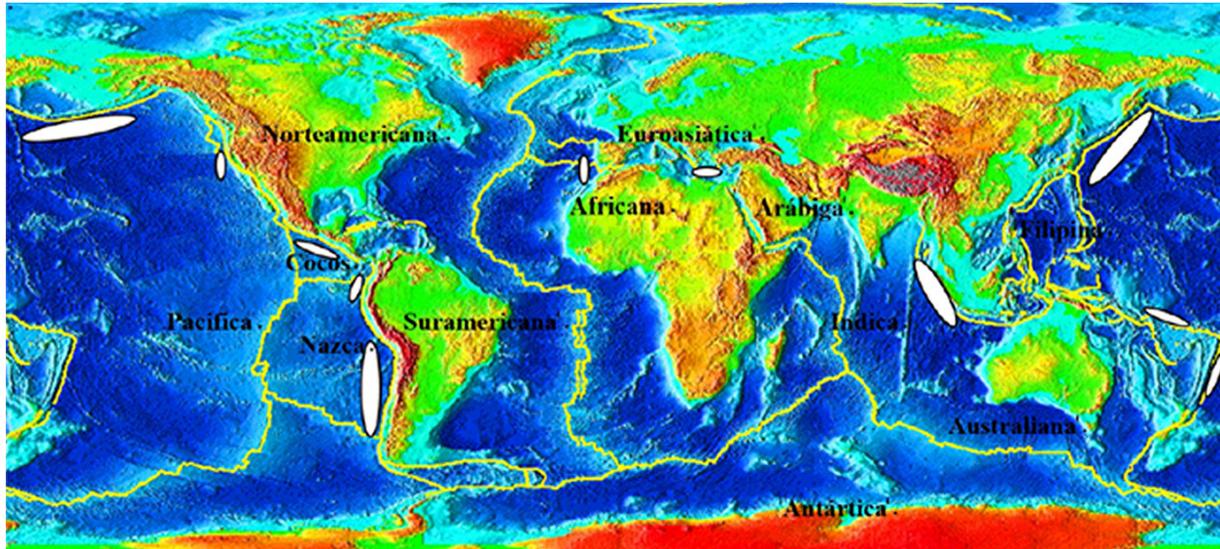


Figura 5. Placas tectónicas y principales zonas de generación de tsunamis alrededor del mundo (elipsoides blancos). Tomado de L. Otero (2008).

La Figura 5 muestra las zonas de mayor actividad sísmica del denominado Cinturón de Fuego, demarcadas por los óvalos blancos, y donde es posible centrar la búsqueda de nuestras fuentes generadoras de tsunami de origen lejano. Para dicha identificación, se tuvo en cuenta lo siguiente: recopilación de la información sobre eventos históricos de tsunamis en las zonas de interés, análisis de la sismicidad histórica de la región, de los mecanismos focales y profundidades de los eventos sísmicos. De ahí, se seleccionaron 6 fuentes potenciales sísmicas con capacidad de producir tsunami, ubicadas en los países de Chile, Cascadia, Salomón, Alaska, Japón y Samoa (Tabla 7) y basadas en los trabajos realizados por (AON, 2011; Beccari, 2009; Chen, Newman, Feng y Fritz, 2009; IRIS, 2013; Johnson *et al.*, 1994; Laverov *et al.*, 2009; Miller, Huene y Ryan, 2014; Muñoz, 2010; Nourse, 2013; Wong, Dober, Pezzopane, Thomas y Terra, 2012).

Técnica probabilista para escenarios de origen cercano

Es posible estimar la peligrosidad de tsunamis y su impacto en la costa a partir de la generación y modelación de posibles eventos sísmicos. La aproximación utilizada, propone un modelo basado en técnicas MonteCarlo que toma en cuenta el nivel del mar en la definición de escenarios tsunamigénicos. Este permite generar escenarios, combinando eventos de tsunami con variaciones del nivel del mar, asociadas a marea astronómica y meteorológica.

La aproximación comprende las siguientes etapas: generación de una base de datos de eventos de tsunami simulados numéricamente para las distintas fuentes de generación, generación de un catálogo sintético de escenarios de tsunamis por fuentes, y por último, la representación probabilística de los valores máximos de las

variables seleccionadas para evaluar la peligrosidad (Otero, 2008). En la primera etapa se realizaron los siguientes pasos, identificación y localización de las potenciales fuentes de tsunami en el Pacífico colombiano, definición

de los escenarios sísmicos para cada una de las fuentes, definición del nivel del mar, generación y propagación de eventos mediante modelación numérica y por último, la selección de valores máximos con las variables de interés.

Tabla 7. Tabla de casos deterministas para eventos tsunamigénicos de origen lejano.

Fuente	Lon (°W)	Lat (°N)	Profundidad (km)	Largo* (km)	Ancho* (km)	Mw
Chile	-72.72	-35.85	10	500	100	8.8
	-74.50	-39.50	10	900	150	9.5
Perú	-71.00	-18.50	10	600	150	9.0
Japón	142.37	38.29	10	300	150	9.0
	144.12	41.75	10	200	50	8.0
Kuril	153.77	46.70	10	400	50	8.3
Cascadia	-124.94	47.32	10	1000	50	9.1
Salomón	-172.04	-15.61	10	200	100	8.0
	165.01	-10.79	10	300	150	8.1
Samoa	172.03	-15.51	10	400	100	8.3
Alaska	-163.5	52.75	10	400	100	8.1
	-175.39	51.56	10	800	100	8.6

* Las casillas denominadas largo y ancho corresponden al área de ruptura que representa el plano de falla y fueron representadas como unidades fuente en el modelo COMMIT.

En la segunda etapa se calcula la frecuencia de sismos tsunamigénicos en la zona, se aplica la función de distribución de probabilidad de momentos sísmicos y la distribución de la localización del epicentro a lo largo de la falla. A continuación se determina la función de distribución de probabilidad del nivel del mar (Marea alta más marea media), para obtener de esta manera el catálogo de todos los escenarios de tsunami por fuentes.

Finalmente, mediante las simulaciones de MonteCarlo es posible determinar la base de datos numérica para cada fuente de tsunami y de esta manera se obtiene los valores máximos de las variables seleccionadas para evaluar la peligrosidad (UniNorte y Dimar, 2014).

En consecuencia, toda vez como se clasificaron las zonas de estudio en la aproximación determinista, Bloque Norte y Bloque Sur; así mismo, se toman las dos zonas en este tipo de aproximación, con un total de tres fuentes de tsunami, dos en el Bloque Norte (segmento Cabo Corrientes-Arusi - Zcca y Arusi - Cabo Marzo- Zacm) y una en el Bloque Sur (Zona de Subducción).

Bloque Norte

En las tablas 8 y 9 se relacionan los epicentros de cada una de las fuentes correspondiente al Bloque Norte del Pacífico colombiano, extraídas mediante la implementación de la aproximación probabilística.

Tabla 8. Epicentros correspondientes a fuente Arusí-Cabo Marzo.

Epicentro	Longitud (°W)	Latitud (°N)
1	-77.6505807	6.11305801
2	-77.7370008	6.55545874
3	-77.5646268	5.67119327

Tabla 9. Epicentros correspondientes a fuente Cabo Corrientes-Arusí.

Epicentro	Longitud (°W)	Latitud (°N)
1	-77.89117999	5.157350981
2	-78.12442452	5.543329967
3	-77.66014769	4.770793276

En las tablas 10 y 11 se muestran los casos probabilísticos de escenarios de tsunami para la fuente Arusí-Cabo Marzo, junto con los

parámetros macrosísmicos, epicentros y nivel de marea asociados a cada caso.

Tabla 10. Casos probabilísticos correspondiente a fuente Arusí-Cabo Marzo.

Casos	Área (km ²)	M _w	Longitud (km)	Ancho (km)	Dislocación (m)	Epicentro	NM
1	500	6.7149906	31.622777	15.811388	0.99173273	1 al 3	3
2	1500	7.1825694	54.772256	27.386128	1.6620406	2	3
3	2500	7.3999812	70.710678	35.355339	2.1130538	2	3
4	3500	7.5431867	83.666003	41.833001	2.4750885	2	3
5	4500	7.6501483	94.86833	47.434165	2.7854068	2	3
6	5500	7.7355554	104.88088	52.440442	3.0609005	2	3
7	6500	7.8066551	114.01754	57.008771	3.3109149	2	3
8	7500	7.86756	122.47449	61.237244	3.5412578	2	3
9	8500	7.9208305	130.38405	65.192024	3.7558275	2	3
10	9500	7.9681691	137.84049	68.920244	3.9573899	2	3
11	10500	8.0107655	144.91377	72.456884	4.1479901	2	3

Los parámetros focales para la fuente Zacm vienen dados por un ángulo de rumbo de 349°, buzamiento de 14° y cabeceo de 53°.

Tabla 11. Casos probabilísticos correspondiente a fuente Cabo Corrientes-Arusí.

Casos	Área (km ²)	Mw	Longitud (km)	Ancho (km)	Dislocación (m)	Epicentro	NM
1	500	6.7149906	31.622777	15.811388	0.99173273	1 al 3	3
2	1500	7.1825694	54.772256	27.386128	1.6620406	2	3
3	2500	7.3999812	70.710678	35.355339	2.1130538	2	3
4	3500	7.5431867	83.666003	41.833001	2.4750885	2	3
5	4500	7.6501483	94.86833	47.434165	2.7854068	2	3
6	5500	7.7355554	104.88088	52.440442	3.0609005	2	3
7	6500	7.8066551	114.01754	57.008771	3.3109149	2	3
8	7500	7.86756	122.47449	61.237244	3.5412578	2	3
9	8500	7.9208305	130.38405	65.192024	3.7558275	2	3
10	9500	7.9681691	137.84049	68.920244	3.9573899	2	3
11	10500	8.0107655	144.91377	72.456884	4.1479901	2	3

Los parámetros focales para la fuente Zcca vienen dados por un ángulo de rumbo de 329°, buzamiento de 40° y cabeceo de 11°.

Bloque Sur (zona de subducción)

Los epicentros asociados a la zona de subducción, se plasman en la Tabla 12.

Tabla 12. Epicentros correspondientes a fuente Zsub.

Epicentro	Longitud (°W)	Latitud (°N)
1	-77.7766724	3.6094985
2	-78.0714722	3.2650874
3	-78.3660889	2.9206491
4	-78.6605377	2.5762107
5	-78.9548416	2.2318006
6	-79.2490234	1.8874463
7	-79.3823929	1.7312667
8	-79.5431137	1.5431753
9	-79.8371277	1.1990154
10	-80.1311035	0.8549942
11	-80.4250488	0.5111392
12	-80.7189941	0.167478

Para el Bloque Sur, el catálogo sintético resultante se muestra en la Tabla 13. Cada caso corresponde a un escenario distinto, con cada uno de sus parámetros macrosísmicos, y los tres niveles de marea, alto, medio y bajo.

Tabla 13. Casos probabilísticos correspondiente a fuente Zsub.

Caso	Área (km ²)	Mw	Longitud (km)	Ancho (km)	Dislocación (km)	Epicentro	NM
1	500	6.7149906	50	10	0.80410762	1 al 12	3
2	1500	7.1825694	86.60254	17.320508	1.3476005	2 al 11	3
3	2500	7.3999812	111.8034	22.36068	1.7132868	2 al 11	3
4	3500	7.5431867	132.28757	26.457513	2.0068285	2 al 11	3
5	5500	7.7355554	165.83124	33.166248	2.4818112	3 al 10	3
6	7500	7.86756	193.64917	38.729833	2.8712901	3 al 10	3
7	9500	7.9681691	217.94495	43.588989	3.2086945	3 al 10	3
8	12500	8.0849718	250	50	3.6504465	3 al 10	3
9	15500	8.1765251	278.38822	55.677644	4.038817	4 al 9	3
10	18500	8.2518283	304.13813	60.827625	4.3890344	4 al 9	3
11	21500	8.3157897	327.87193	65.574385	4.7102543	4 al 9	3
12	24500	8.3713828	350	70	5.0084845	4 al 9	3
13	28500	8.435748	377.49172	75.498344	5.3774374	5 al 8	3
14	32500	8.4916457	403.11289	80.622577	5.7198344	5 al 8	3
15	36500	8.541047	427.20019	85.440037	6.0405422	5 al 8	3
16	40500	8.5853059	450	90	6.3431085	5 al 8	3
17	44500	8.6253928	471.69906	94.339811	6.630213	6 al 7	3
18	49500	8.6707131	497.49372	99.498744	6.9704805	6 al 7	3
19	54500	8.7116686	522.01533	104.40307	7.2929734	6 al 7	3
20	59500	8.7490266	545.43561	109.08712	7.600134	6 al 7	3
21	64500	8.7833685	567.89083	113.57817	7.8938949	6 al 7	3
22	67500	8.8027177	580.9475	116.1895	8.0643812	6 al 7	3

Nivel de marea de referencia

El cambio en el nivel del mar en el Pacífico colombiano es significativo, por efectos de la marea, que es el proceso que más afección tiene en el ascenso y descenso periódico del nivel del mar (Valls y Josep, 2009). Por esta razón es necesario asociar un nivel de marea a cada evento de *tsunami* modelado; esto debido a la superposición existente entre las ondas de tsunami y las ondas de marea. Lo que podría significar un aumento en el nivel de inundación o *run-up* de las zonas bajo estudio (Cardona, 2004).

La metodología empleada para definir el nivel de marea asociado, está basado en el análisis por

separado de la marea astronómica utilizando un análisis armónico, modelos numéricos de propagación y generación de marea; y la marea meteorológica, empleando métodos indirectos basados en técnicas de MonteCarlo debido al carácter aleatorio de la misma. Basado en los trabajos realizados en el Centro de Investigación de Dimar (Otero, 2005), se extrae el régimen medio del nivel del mar (figuras 6 y 7) obtenido para la población de Buenaventura y Tumaco, respectivamente.

A partir de las figuras, es posible extraer los niveles de marea alta, media y baja (Tabla 14), valores que son sumados a las mallas de detalle, con el fin de evaluar el grado de inundación en la zona de estudio.

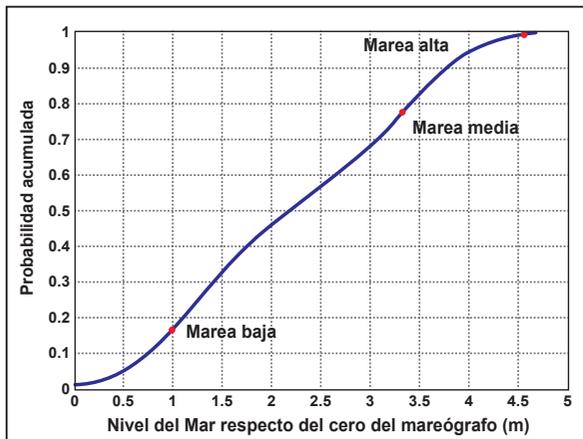


Figura 6. Régimen medio determinado para el casco urbano de Buenaventura.

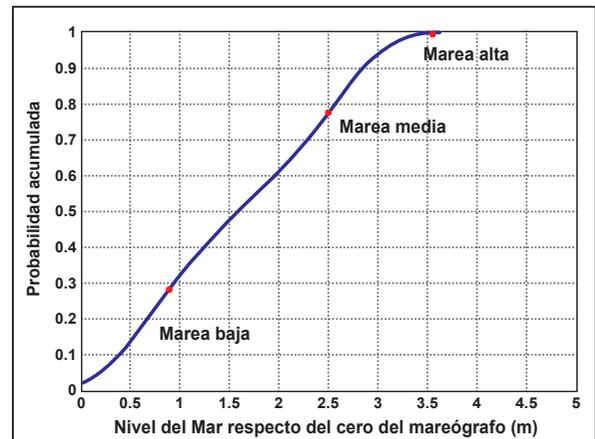


Figura 7. Régimen medio determinado para el casco urbano de Tumaco.

Tabla 14. Niveles de marea para las poblaciones de interés.

Zona de interés	Nivel Marea Alta (m)	Nivel Marea Media (m)	Nivel Marea Baja (m)
Buenaventura	4.8	3.26	1.0
Tumaco	3.6	2.50	0.80

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó la modelación de todos los escenarios propuestos tanto por la técnica determinista como

la probabilista, de cada una de las poblaciones evaluadas, donde fue posible determinar que los escenarios que mayor afectación generan sobre las poblaciones de Tumaco y Buenaventura, son los eventos propuestos mediante la aproximación determinista; es decir, el peor escenario creíble de tsunami.

Para sintetizar y estructurar los resultados obtenidos de una manera más conveniente para su análisis, se decide discutir los escenarios con mayor afectación sobre cada población costera, siguiendo una estructura que permita distinguir y comparar los efectos del tsunami según el origen donde se genera el evento.

Peor escenario creíble de origen cercano para el Pacífico colombiano

La Figura 8 muestra un máximo desplazamiento de la superficie libre, tomando un nivel de marea alta, tanto para las poblaciones de Tumaco y Buenaventura, donde es posible apreciar una altura máxima de lámina inundante de aproximadamente 3 metros para la isla del Morro y de 2 metros para la isla de Tumaco, mientras que la altura máxima de la ola en Buenaventura es de aproximadamente 1.3 m. Por lo que se deduce, que la población de Tumaco debido a la cercanía

con la zona de subducción tiene una mayor afectación, mientras que Buenaventura, presenta una menor afectación debido a la geomorfología de su costa, al ser una bahía cerrada que permite que la energía proveniente del tren de ondas de tsunami, disminuya por su tránsito en la entrada a la bahía.

Con el fin de registrar la evolución temporal de la superficie libre en las zonas de interés, se establecieron puntos costeros en la entrada de bahía de Buenaventura y Tumaco, como se registran en la Tabla 15.

Tabla 15. Ubicación geográfica de los puntos de interés en el casco urbano de Buenaventura y Tumaco.

Población	Coordenadas
Buenaventura	77.086511°W ; 3.8701111°N
Tumaco	78.776466°W ; 1.843966°N

La Figura 8 también visualiza los mareogramas sintéticos obtenidos de los puntos seleccionados, donde el tiempo de llegada de la primera onda de tsunami a la costa para el casco urbano de Tumaco, es de 26 minutos aproximadamente, mientras que para Buenaventura es de 35 minutos. Sin embargo, Buenaventura presenta una característica en particular y se debe al aumento en la amplitud de onda en el minuto 132, lo que significa que este resultado es particularmente importante a la hora de diseñar los planes de contingencia o emergencia; considerando que con este resultado las personas deberían permanecer hora y media en la zona de evacuación hasta que la alerta disminuya.

Peor escenario creíble de origen regional para el Pacífico colombiano

La Figura 9 muestra el máximo desplazamiento de la superficie libre para el nivel de marea alta en las poblaciones de interés debido a eventos tsunamigénicos de origen regional. Un escenario como este generaría un impacto medio, en comparación a un evento de origen cercano, debido a que los máximos valores que alcanzan Tumaco y Buenaventura son 0.11 m y 0.051 m respectivamente. Igualmente, la evolución temporal de la superficie libre, viene dado por los tiempos de arribo de 218 minutos

y 301 minutos para Tumaco y Buenaventura, respectivamente. Además en Buenaventura, se observa que los valores máximos de la superficie libre se encuentran en el primer tren de olas, lo que cambia respecto a los resultados obtenidos en la modelación de origen cercano.

Peor escenario creíble de origen lejano para el Pacífico colombiano

Un evento generado por fuentes de origen lejano (Figura 10) provoca un impacto mínimo para Tumaco y Buenaventura, esto se debe a que el tren de ondas de tsunami que viaja desde su origen hasta la costa, disminuye su energía desde el sitio de generación hasta la entrada a las bahías, lo cual es producto de la fricción con el lecho marino y por ende solo se percibe una pequeña alteración del nivel del mar (aproximadamente 5 cm) en las poblaciones evaluadas. Esta pequeña alteración del nivel del mar se reflejaría en las bahías, alrededor de 3 a 4 horas una vez ocurrido el evento.

Todas las salidas gráficas de los 1020 escenarios simulados contienen información acerca de la inundación máxima y mareograma sintético, estos resultados fueron recopilados en una base de datos; donde los parámetros de almacenamiento son, epicentro del sismo, magnitud, profundidad y nivel de marea.

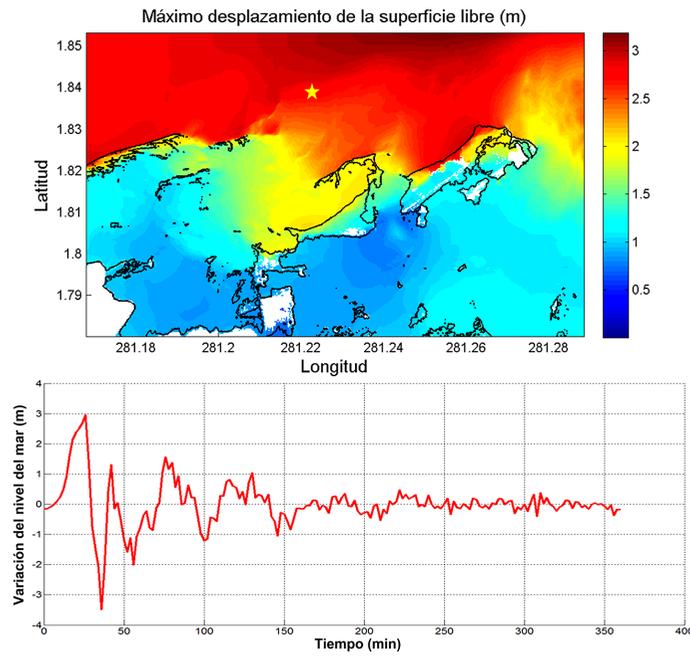


Figura 8 (a)

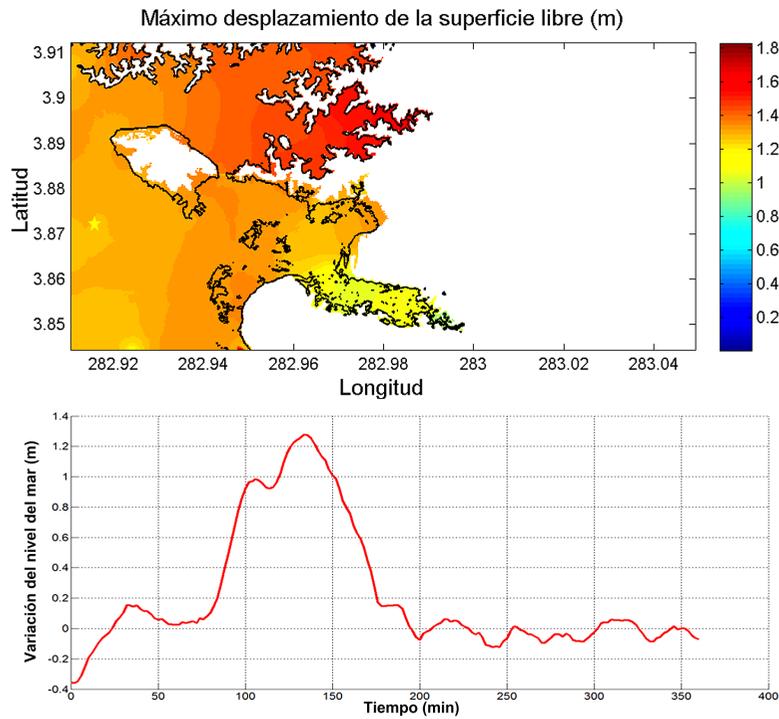


Figura 8 (b)

Figura 8. Resultado de escenario tsunami mas extremo de origen cercano con magnitud Mw 8.8 para la población de (a) Tumaco y (b) Buenaventura. La estrella corresponde a la ubicación del mareógrafo sintético.

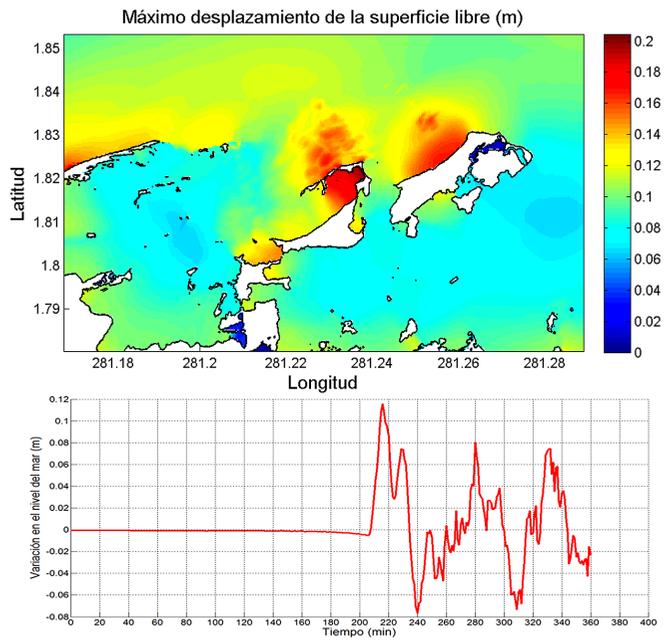


Figura 9 (a)

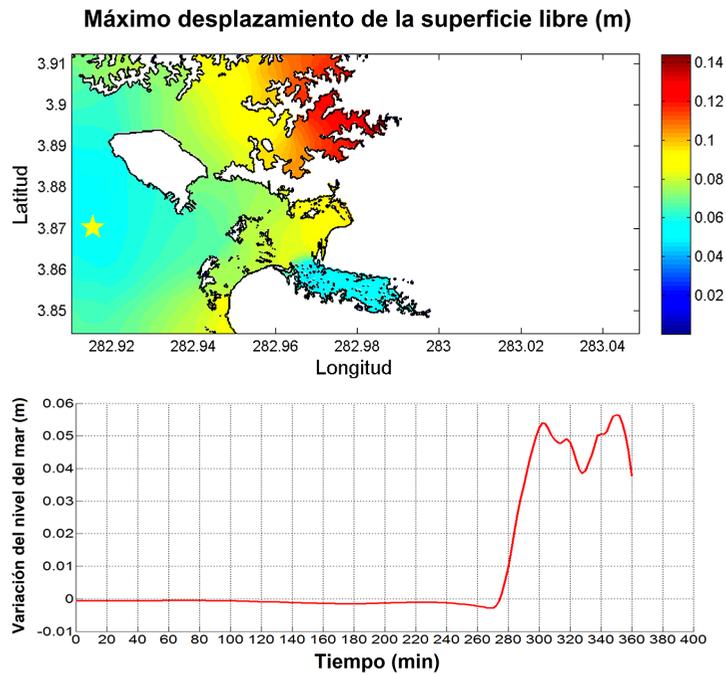


Figura 9 (b)

Figura 9. Resultado de escenario tsunami mas extremo de origen regional (Chiapas Mw. 8.2) para la población de (a) Tumaco y (b) Buenaventura. La estrella corresponde a la ubicación del mareógrafo sintético.

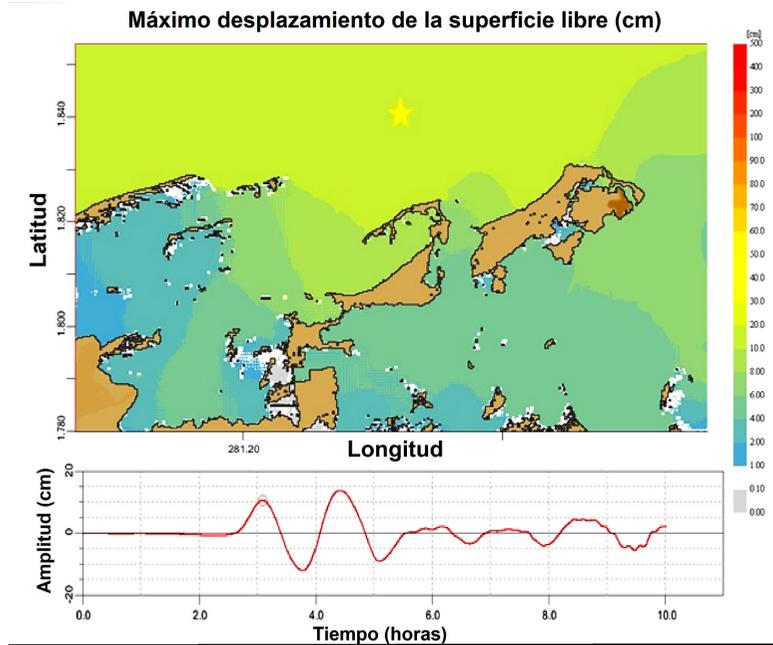


Figura 10 (a)

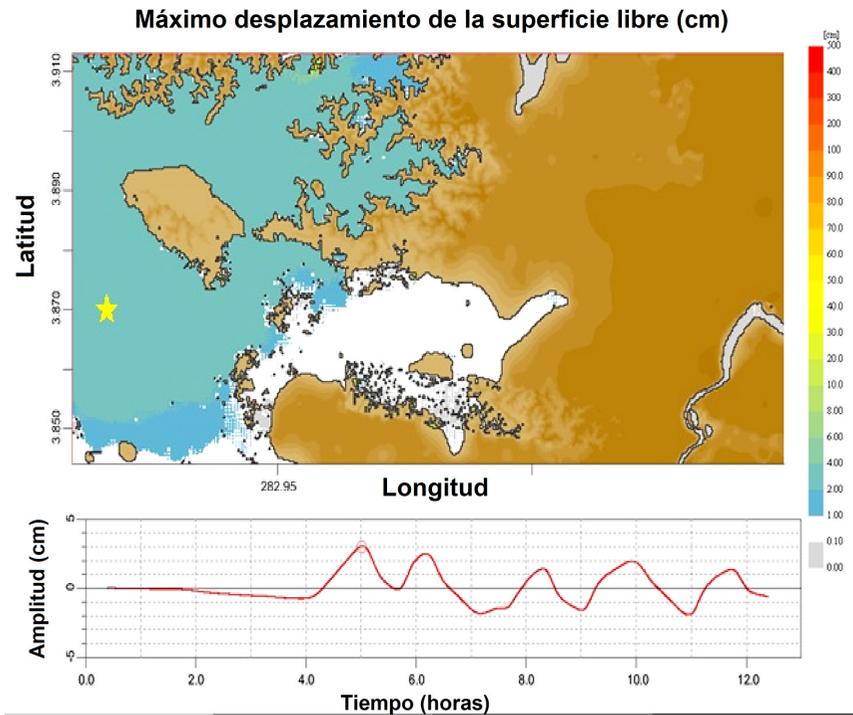


Figura 10 (b)

Figura 10. Resultado de escenario tsunami mas extremo de origen lejano (Chile Mw 9.0) para la población de (a) Tumaco y (b) Buenaventura. La estrella corresponde a la ubicación del mareógrafo sintético. La estrella corresponde a la ubicación del mareógrafo sintético.

CONCLUSIONES

La base de datos es una herramienta fundamental en la evaluación de un evento real de tsunami, porque ayuda a mitigar dicha amenaza permitiendo tomar medidas preventivas en las zonas de riesgo. Para el caso de producirse un evento similar al máximo creíble de origen cercano, la población de Tumaco solo contaría con aproximadamente 26 minutos para evacuar las zonas de resguardo antes del arribo de las ondas de tsunami, mientras que la población de Buenaventura contaría con 106 minutos más, que la anterior. Por lo que se recomienda, y sobre todo en Tumaco, que las autoridades locales y departamentales, deben establecer planes de contingencia rápidos y efectivos en sus centros poblados, para lograr disminuir los efectos en este tipo de amenazas.

Las zonas de inundación demarcadas en la malla de detalle se obtuvieron con mayor precisión gracias a la información LiDAR de alta resolución, debido a que es posible representar de una manera más cercana a la realidad, la morfología del terreno y la transición de agua-tierra de la onda de tsunami, para obtener de esta manera una altura del run-up con más detalle y claridad.

Para obtener una mayor densidad de la base de datos de eventos tsunamigénicos, se realizó la modelación para epicentros de origen cercano, regional y lejano, en los tres niveles de marea, alta, media y baja y para las poblaciones bajo estudio, Buenaventura y Tumaco. De esta manera es posible evaluar la amenaza y establecer respuestas frente a un suceso real, dependiendo de los parámetros macrosísmicos; finalmente se determinó que el escenario determinista de origen cercano, es el evento que mayor afectación causa sobre las poblaciones evaluadas. Lo que se corrobora con los resultados obtenidos, donde se observa que los valores de inundación para origen cercano, son mayores que para un evento de origen lejano, donde se presenta solamente una pequeña perturbación del nivel del mar, lo que significa que en este último no se produce perturbación en la columna de agua capaz de generar ondas de tsunami en las poblaciones evaluadas.

Los resultados aquí mostrados sugieren que es importante realizar una mayor densificación del banco de escenarios para regiones mayormente pobladas del Pacífico colombiano, como Bahía Málaga, Juanchaco, Ciudad Mutis, Bahía Solano y Curay, debido a que el comportamiento del tren de olas de tsunami difiere según la geomorfología del fondo marino y por ende los resultados son variantes según cada costa. Así mismo, es conveniente realizar escenarios de inundación para poblaciones del Caribe, debido a que según la bibliografía consultada se identifican fallas sísmicamente activas en esta zona. Lo que significa un avance significativo en el estudio de este fenómeno para el Caribe colombiano.

REFERENCIAS

- Álvarez, J., Gutiérrez, O., Aniel, I., y Gonzáles, M. (2012). Tsunamigenic potential of subduction outer-rise normal faults in Central America. *Tectonophysics*, 574-75, 133-143.
- AON. (2011). *Tohoku Earthquake y Tsunami Event Recap Report*.
- Beccari, B. (2009). Measurements and Impacts of the Chilean Tsunami of May 1960 in New South Wales, Australia. *Natural Hazards*, 46(May 1960), 35-52.
- Cardona, Y. (2004). Análisis del arribo de ondas de tsunami a las poblaciones de la bahía de Tumaco a través de señales sintéticas, 32(11), 42-49.
- Cardona, Y., Toro, M., Vélez, J. y Otero, L. (2005). Modelación de *Tsunamis* en la costa Pacífica colombiana: caso Bahía de Tumaco. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 1(12), 43-54.
- Ceresis. (2015). Centro Regional de Sismología para América del Sur. Recuperado de <http://www.ceresis.org/>.
- Chen, T., Newman, A. V., Feng, L. y Fritz, H. M. (2009). Slip distribution from the 1 April 2007 Solomon Islands earthquake: A unique image of near-trench rupture. *Geophysical Research Letters*, 36(16), 6-11. doi:10.1029/2009GL039496

- 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
- Corporación OSSO. (2004). Seminario Internacional Ambiental CVC 50 años. Cali, Colombia. Recuperado de <http://www.osso.org.co/docu/congresos/2004/solano.html>
- 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/>
- Geist, E., y Parsons, T. (2006). Probabilistic analysis of tsunami hazards. *Natural Hazards*, 37(3), 277-314. doi:10.1007/s11069-005-4646-z
- CMT. (2015). Global CMT Catalog Search. Recuperado de <http://www.globalcmt.org/CMT-search.html>.
- González, G. Otero, L.(2010). Peligrosidad debido a *tsunamis* en la Costa Pacífica Colombiana: en el Golfo de Cúpica. Boletín Científico CIOH No. 28, 25-53.
- Hayes, G., Smoczyk, G., Benz, H., Villaseñor, A., y Furlong, K. (2015). *Seismicity of the Earth 1900 - 2013 Seismotectonics of South America (Nazca Plate Region) Trinidad and Tobago*.
- IRIS. (2013). *Magnitude 8.0 SOLOMON ISLANDS*. Recuperado de <https://www.yumpu.com/en/document/view/23511070/magnitud-de-80-solomon-islands-iris>.
- Johnson, J. M., Tanioka, Y., Ruff, L. J., Satake, K., Kanamori, H., y Sykes, L. R. (1994). The 1957 great Aleutian earthquake. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 142(1), 3-28. doi:10.1007/BF00875966
- Kanamori, H., y Anderson, D. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Boletín of the Seismological society of America*, 65, 1073-1095.
- iKanamori, B. H. y McNally, K. (1982). Variable rupture mode of the subduction zone along the ecuador-colombia coast, 72(4), 1241-1253.
- Laverov, N. P., Lobkovsky, L. I., Levin, B. W., Rabinovich, A. B., Kulikov, E. A., Fine, I. V, y Thomson, R. E. (2009). The Kuril Earthquakes and Tsunamis of November 15, 2006, and January 13, 2007: Observations, Analysis, and Numerical Modeling. *Doklady Earth Sciences*, 426(2), 658-664. doi:10.1134/S1028334X09040333
- Miller, B. J. J., Huene, R. Von y Ryan, H. (2014). *The 1946 Unimak Tsunami Earthquake Area : Revised Tectonic Structure in Reprocessed Seismic Images and a Suspect Near-Field Tsunami Source*. ResearchGate, 2-4.
- Muñoz, R. (2010). Terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010. efectos urbanos en localidades de la provincia de arauco, 43-62 revista y editorial.
- NOAA. (2015). Natural hazard viewer -Maps. Recuperado de <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/hazards/?layers=0>
- Nourse, K. (2013). *Cascadia Subduction Zone Earthquakes: A Magnitude 9.0 Earthquake Scenario*. Recuperado de http://www.crew.org/sites/default/files/cascadia_subduction_scenario_2013.pdf
- Otero, L. (2005) Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas (bahías, estuarios, etc.) cuando no se tienen registros instrumentales. Dirección General Marítima - Centro Control Contaminación del Pacífico. San Andrés de Tumaco, Colombia, 54.
- Otero, L. (2008). *Metodología para evaluar la peligrosidad debido a tsunamis en zonas costeras*. Universidad de Cantabria.
- Otero, L., Restrepo, J. C., y Gonzalez, M. (2014). Tsunami hazard assessment in the southern Colombian Pacific basin and a proposal to regenerate a previous barrier island as protection. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(5), 1155-1168.

- 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.
- Engdah, E. R., Van der Hilst, R. D., y Buland, R. P. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 (3), 722-743.
- Rousseeuw, P. J., y Leroy, A. M. (1987). *Robust Regression and Outlier Detection*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley y Sons, Inc.
- Sánchez, R., y Puentes, M. (2012). Estimación de la amenaza por tsunami en el municipio de San Andrés de Tumaco, Pacífico colombiano, utilizando información LiDAR, *Boletín Científico CIOH*, 30:29-42.
- Taboada, A., Dimate, C., y Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *Física de la tierra*, 111-147.
- UNGRD. (2013). *Informe: escenario simulacro binacional Colombia-Ecuador por sismo-tsunami*.
- Uninorte y Dimar. (2014). *Densificación y sistematización de un banco de escenarios de ventos tsunamigénicos, aplicando el método PTHA, fase: I: zona de estudio Pacífico colombiano*.
- Valls, P. y Josep, M. (2009). La medición del nivel medio del mar: principios y métodos. Universidad Politécnica de Cantabria, 6-10.
- V. V. Titov, F. I. González y P. M. E. L. (U.S.). (1997). Implementation and Testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) Model. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Pacific Marine Environmental Laboratory.
- V. V. Titov, C. W. Moore, D. J. M. Greenslade, C. Pattiaratchi, R. Badal, C. E. Synolakis, y U. Kânoğlu. (2011). A New Tool for Inundation Modeling: Community Modeling Interface for Tsunamis (ComMIT), *Pure and Applied Geophysics*, vol. 168, no. 11, pp. 2121-2131.
- V. V. Titov y C.E. Synolakis. (1995). *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.* 121, 308-316.
- Wang, X. (2009). User manual for COMCOT version 1.7 (first draft). *Cornel University*, 7. Pags.
- 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.
- Wong, I., Dober, M., Pezzopane, S., Thomas, P., y Terra, F. (2012). Seismic Hazard Above the South America Subduction Zone in Southern Peru. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, 1-10.