

Estimación de la amenaza por tsunami en el municipio de San Andrés de Tumaco, Pacífico colombiano, utilizando información LiDAR

Tsunami hazard assessments in municipality of San Andrés of Tumaco, Colombian Pacific, using information LiDAR

Fecha de recepción: 2012-02-10 / Fecha de aceptación: 2012-08-15

Ronald Sánchez E. ¹ y Milton Puentes G. ²

¹ **Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP)**. Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras. Capitanía de Puerto de Tumaco, Vía El Morro, Tumaco, Colombia. Correo electrónico: rsanchez@dimar.mil.co. Tel: +57 (2) 727 26 37.

² **Dirección General Marítima**. Subdirección de Desarrollo Marítimo. Carrera 54 No. 26-50 CAN, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: mpuentes@dimar.mil.co. Tel: +57 (1) 220 04 90.

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. Bol. Cient. CIOH (30): 29-42.

RESUMEN

Se estimó la amenaza por tsunami en el área urbana del municipio de San Andrés de Tumaco, a partir de la simulación numérica de escenarios basados en el evento real de tsunami de 1979 que causó daños considerables en el municipio. Se utilizó batimetría de detalle de 15 m de resolución espacial (multihaz) e información Light Detection and Ranging (LiDAR) que permite representar la altimetría del terreno del área de estudio con una exactitud posicional de ± 30 cm en el plano vertical y ± 30 cm en el plano horizontal de acuerdo con los datos adquiridos por Dimar. Los resultados indican que el escenario denominado E1, simulado con parámetros macrosísmicos y de marea idénticos a los del escenario utilizado para elaborar el mapa oficial del municipio en 2004, provoca cambios significativos en las zonas de inundación del área urbana del municipio. El tiempo de llegada del tsunami varía en promedio entre 20 y 18 minutos. Finalmente, se realiza una comparación entre los mapas de inundación por tsunami elaborados para el municipio en 2004 y 2012, encontrando que la isla de Tumaco, con inundación aproximada del 88 % en el mapa 2004, presenta inundación del 96 % en el mapa de 2012, lo cual representa más de 100 000 m² de área inundada en la isla. La determinación de escenarios de inundación por tsunami contribuye a la disminución de la vulnerabilidad de los pobladores de las zonas costeras ante este evento de origen natural, toda vez que son una herramienta base para la formulación de planes municipales de contingencia ante tsunami y permiten a la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo la toma de decisiones concernientes al manejo de desastres, a los planes de capacitación en respuesta ante tsunami y a la formulación de estrategias de mitigación.

Palabras clave: San Andrés de Tumaco, tsunami, modelación numérica, nivel del mar, LiDAR, actividad sísmica.

ABSTRACT

Was estimated the tsunami hazard in the urban area of the municipality San Andres of Tumaco, from the numerical simulation of scenarios based on real events of 1979 tsunami that affected significantly the municipality. Detailed bathymetry was used 15 m spatial resolution (multibeam) and information LiDAR (Light Detection and Ranging), which can represent with an accuracy of ± 30 cm in the vertical plane and ± 30 m in the horizontal plane of terrain altimetry study area, according to data acquired by DIMAR. The results indicate that the E1 scenario simulated with Macroseismic and Tides parameters, identical to the scenario used to develop the official map of the municipality in 2004, caused significant changes in flood areas urban area. The tsunami arrival time varies on average between 20 and 18 minutes. Finally a comparison is made between the 2004 and 2012 maps of tsunami inundation in the municipality, finding Tumaco Island, with about 88% Flood Map 2004, presents flood 96% in map 2012, representing more than 100,000 m² of flooded area in the island. The determination of tsunami inundation scenarios contributes to reducing the vulnerability of the residents of coastal areas to natural event, since it is a basic tool for formulating contingency plans tsunami municipal and allow National Unity Risk Management decision-making concerning the management of disasters, plans tsunami response training and the development of mitigation strategies.

Key words: San Andrés de Tumaco, tsunami, numerical modeling, sea level, LiDAR, seismic activity.

INTRODUCCIÓN

La causa más frecuente de generación de tsunami son los sismos con origen en el océano, con mayor frecuencia en las zonas de subducción. La zona de subducción del Pacífico Sudeste, creada por el límite activo entre las placas tectónicas de Nazca y Suramericana, presenta alta actividad sísmica [1]; en esta zona se generaron sismos precursores de tsunami como los registrados en 1906, 1942, 1958 y 1979, los cuales afectaron la costa Pacífica colombiana [2]. Por su ubicación geográfica, próxima a la zona de subducción en el Pacífico colombiano, el municipio de San Andrés de Tumaco en su área urbana (Figura 1) presenta un alto grado de amenaza a fenómenos naturales como tsunami. Sumado a una alta vulnerabilidad, debido a las condiciones de densidad poblacional y socio-económicas que lo convierten en un reto para las autoridades locales y nacionales [3]. Recientes eventos de tsunami en la región del Pacífico Sudeste (Perú, 2007 y Chile, 2010), ponen de manifiesto la inminente amenaza a la cual se encuentra expuesta la población de Tumaco, razón por la cual se hace necesario actualizar los estudios de amenaza por tsunami, teniendo en cuenta las actuales condiciones de riesgo.

Diferentes autores han evaluado la amenaza por tsunami de origen cercano en Tumaco, a partir de técnicas de modelación numérica de eventos de tsunami reales y probabilísticos [5] [6] [1] [3] [2], generando como resultado mapas de inundación por tsunami que sirvieron como herramienta fundamental en la creación de planes de mitigación y atención de desastres en el municipio [4]. De la misma manera, los anteriores estudios recomiendan aumentar el nivel de detalle de la información base (batimetría, altimetría) con la cual se realizan las simulaciones de eventos de tsunami, con el fin de establecer con mayor precisión las zonas de inundación en los mapas y de esta manera, evaluar con mayor rigor la amenaza [1] [5] [6]. Por otro lado, la fuerte dinámica sedimentaria en la Bahía de Tumaco y sus marcados cambios en la morfología litoral, pueden ser factores importantes en la determinación del nivel de inundación y la extensión o *run-up* de un tsunami [7], es decir la medida de inundación máxima al interior de la costa.

Los daños a gran escala causados por el impacto de tsunamis generados por sismos de características similares al evento de 1979, hacen que no sea necesario suponer eventos extremos para definir el grado de amenaza en la zona de estudio [6]. De otro lado, [3] reportó que un evento de tsunami con características similares al de 1979 es desastroso considerando la inundación y el corto tiempo de llegada de las olas. Lo anterior y lo bien documentado del evento de 1979, hace que se considere como un referente apropiado

para evaluar la amenaza por tsunami en la zona de estudio.

Por las anteriores razones, el presente estudio plantea evaluar la amenaza por tsunami utilizando datos LiDAR y batimetrías de detalle de 15 m de resolución espacial (Multihaz), como información base para la modelación numérica del tsunami de 1979 que afectó la población de Tumaco y, de esta manera generar un mapa actualizado de inundación por tsunami, tomando como referencia el mapa de inundación actual del municipio. La ventaja de usar datos LiDAR para la modelación de tsunami es la precisión en la medida de la altimetría del terreno ± 15 cm en el plano vertical y ± 30 cm en el plano horizontal, lo cual influye significativamente en la definición de la extensión y la profundidad de la inundación por tsunami [8].

La modelación numérica del evento de tsunami de 1979 se realiza a partir de la ejecución de modelos numéricos de generación, propagación e inundación de tsunami, integrados en el proyecto *Tsunami Inundation Modeling for Exchange* (TIME), una iniciativa de transferencia tecnológica patrocinada por la Comisión de Tsunamis de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica y el Grupo Coordinador Internacional del Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico.

Este trabajo presenta la metodología y los resultados que permitieron generar el mapa actualizado de inundación por tsunami de origen cercano en el área urbana del municipio de San Andrés de Tumaco. El mapa se espera sirva de herramienta base para la actualización de los planes de emergencia local, regional y nacional que tienen como objeto mitigar los efectos devastadores de un evento natural tan desastroso como lo es un tsunami.

ÁREA DE ESTUDIO

Casco urbano del municipio de San Andrés de Tumaco, en la bahía del mismo nombre, costa Pacífica nariñense, suroccidente colombiano. (Figura 1).

METODOLOGÍA

Las bases de la modelación de tsunami incluyen aspectos morfotectónicos y de dinámica oceánica [9], representados en tres etapas: generación, propagación e inundación o *run-up*. Utilizando los modelos integrados en el proyecto TIME se modelaron las tres etapas.



Figura 1. Ubicación: área urbana municipio de San Andrés de Tumaco. El punto rojo indica la zona de los epicentros reportados para el evento de tsunami de 1979.

La generación, entendida como la condición inicial del tsunami, se determina a partir del modelo propuesto por Mansinha y Smylie (1971) [10], el cual supone una deformación instantánea de la superficie del océano idéntica a la deformación vertical del fondo marino [10], de esta manera se calculó el campo de deformación del lecho marino simulando la generación del tsunami, aunque en la realidad el fondo marino no es perfectamente elástico y hay un pequeño periodo de transición que no supera los 2 segundos, y la simplificación representa aproximadamente la realidad [7].

El modelo de Goto y Ogawa (1992) [11] simula la propagación del tren de ondas de tsunami. El modelo de propagación consta de las ecuaciones de movimiento no lineales para aguas someras integradas en vertical y la ecuación de continuidad sin el término de efecto Coriolis, incluyendo un algoritmo de fricción de fondo construido al interior del modelo. La ecuación de continuidad y las ecuaciones de movimiento se discretizan en un esquema a diferencias finitas centrales, denominado "salto de rana". La inundación de

las zonas costeras se determina empleando la condición de frontera móvil propuesta por Iwasaki y Mano (1979) [9]. Para la ejecución de los modelos numéricos se definen condiciones iniciales tales como: escenario sísmico para la generación de las ondas de tsunami; mallas e intervalo de cálculo para establecer un dominio de integración discreto; nivel de marea para definir extensión de la inundación, toda vez que las ondas de tsunami se superponen a las ondas de marea generando una mayor inundación [12], y puntos de extracción de señales sintéticas para determinar el tiempo de llegada del tren de olas de tsunami en puntos específicos.

Definición de escenarios sísmicos

La información que describe el evento de tsunami del 12 de diciembre de 1979, cambia de una fuente a otra. Estudios de Cardona [1] [3] presentan parámetros macrosísmicos diferentes a los reportados por el Servicio Geológico

Colombiano del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas) [13] para el mismo evento. Esta investigación planteó simular dos escenarios.

El primero, E1, tomado de los estudios de Cardona, por ser el escenario base de simulación para la realización del mapa de inundación por tsunami en el área urbana del municipio de San Andrés de Tumaco. El segundo, escenario E2, fundamentado en la información reportada por

Ingeominas, por ser la entidad encargada en Colombia de los datos sísmicos. Los parámetros que caracterizan los escenarios son: localización del sismo precursor (epicentro), magnitud del sismo, mecanismo focal o geometría de la falla, profundidad, área de ruptura del plano de falla y dislocación del plano de falla. Con base en lo anterior, se definieron dos escenarios de simulación para el sismo precursor de tsunami de 1979. Los parámetros se muestran en la (Tabla I).

Tabla I. Parámetros de los escenarios sísmicos.

Parámetros	Escenario E1	Escenario E2
Epicentro (°)	1,57° N; -79,36° W	1,60° N; -79,36° W
Magnitud (Mw)	7;9	8;1
Rumbo (°)	30	30
Buzamiento (°)	16	16
Ángulo de deslizamiento (°)	118	118
Profundidad (km)	26,6	25
Dislocación del plano de falla (m)	4	5
Longitud de la falla (Km)	180	200
Ancho de la falla (Km)	70	100

La localización de los epicentros reportados por Cardona e Ingeominas se muestra en la (Figura 1). La información del mecanismo focal y la profundidad para el escenario E1 es reportada en [1], con fundamento en Gustscher *et al.* (1999) y en *Harvard CMT Catalog*. Para el escenario E2 la fuente no reporta información del mecanismo focal, por esta razón se tomaron los datos del escenario E1.

El área de ruptura (longitud y ancho del plano de falla) y la dislocación del plano de falla fueron calculados a partir de las magnitudes sísmicas de momento $M_w=7,9$ y $M_w=8,1$ (Tabla I), utilizando las siguientes relaciones empíricas propuestas por Wells y Coppersmith (1994).

$$M_w = (0,98 \pm 0,03) \log A_r + (4,07 \pm 0,06) \quad (1)$$

$$\log D = (0,69 \pm 0,08) M_w - (4,80 \pm 0,57) \quad (2)$$

Donde,

M_w , es la magnitud de momento del sismo.

A_r , es el área del plano de falla.

D , es la dislocación del plano de falla.

**Mallas de cálculo:
batimetría y altimetría**

En esta investigación se utilizó información de levantamientos batimétricos realizados por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP) y el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), actualiza al año 2012, con espaciamiento entre puntos de 15 m para el área de evaluación de las olas de tsunami (malla D) e información de cartas náuticas y batimetrías globales para el resto del dominio.

La información altimétrica del área continental de evaluación fue adquirida a partir de datos LiDAR de alta resolución; estos fueron adquiridos mediante un sistema de sensoramiento remoto activo que utiliza el infrarrojo cercano, este sistema se compone de una plataforma aérea en donde se instalan el sensor LiDAR, un GPS (otro GPS se instala en tierra, como base para permitir la trilateración en el cálculo de posición) y una unidad de movimiento inercial (equipo que contribuye a la corrección de los tres movimientos de deriva de la aeronave). Una vez en vuelo, se envían señales láser a la superficie terrestre

que retornan al sensor, el cálculo del tiempo que demora este proceso en conjunto con los datos del GPS ya corregidos, proporcionan la posición 3D (x, y, z) de cada punto.

El sensor LiDAR obtiene información muy precisa de altura del terreno (± 30 cm), lo que garantiza un modelo de elevación idóneo para ser utilizado en estudios de gestión del riesgo, entre los que se destaca la determinación de escenarios de inundación.

La línea de costa fue extraída a partir de la digitalización de aerofotografías a escala de digitalización 1:2000, toda esta información fue homogenizada al mismo nivel de referencia que corresponde al nivel medio del mar (NMM) para Colombia.

Finalmente, se generó un modelo de elevación digital con base en los datos LiDAR que tiene disponible Dirección General Marítima (Dimar) (Figura 2).

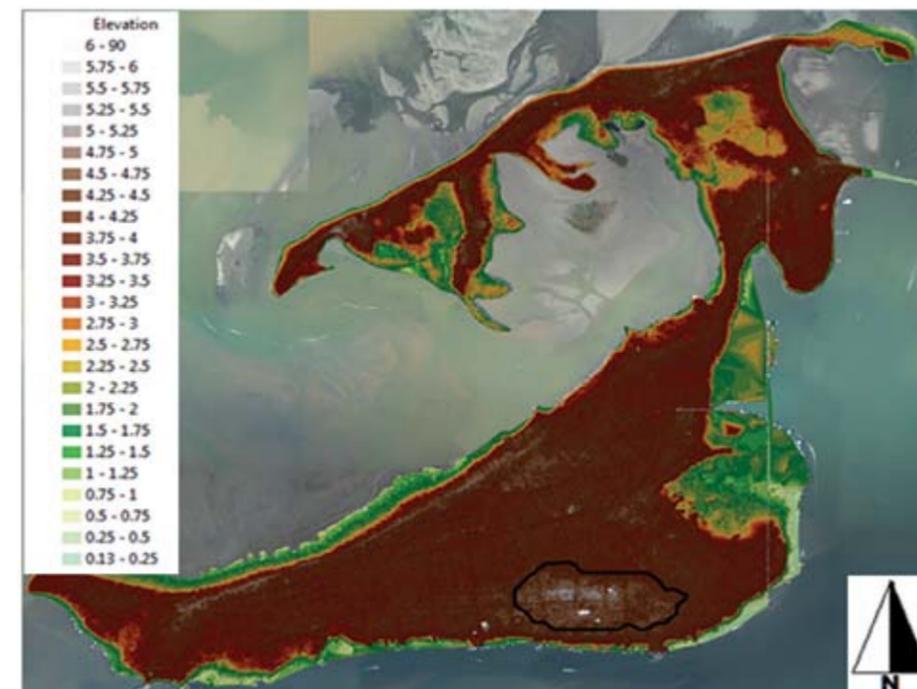


Figura 2. Modelo de elevación digital islas de Tumaco y La Viciosa. Sistema de coordenadas MAGNA Colombia Bogotá.

El dominio de cálculo se discretizó elaborando para el área de estudio cuatro mallas anidadas, donde la más interna (malla D) tuvo espaciamiento de 30 m (~ 1 segundo de arco). Conservando la relación de 1:3 entre las mallas, las exteriores fueron creadas con espaciamiento

de 90 m (malla C), 270 m (malla B) y 810 m (malla A) (Figura 3). La malla A abarcó las zonas de generación del sismo y la malla D el lugar específico sobre el cual se evaluó la incidencia de olas de tsunami. Los límites y tamaños de las mismas se relacionan en la Tabla II.

Tabla II. Límites y tamaños de las mallas utilizadas.

Malla	Límite inferior izquierdo	Límite superior derecho	Tamaño
A	(-83.000277°W; 0.103888°N)	(-76.992777°W; 5.998888°N)	802 x 787
B	(-79.997777°W; 1.501388°N)	(-76.997777°W; 5.003888°N)	1201 x 1402
C	(-78.934444°W; 1.599722°N)	(-78.499444°W; 2.199722°N)	523 x 721
D	(-78.820000°W; 1.770000°N)	(-78.720000°W; 1.840000°N)	361 x 253

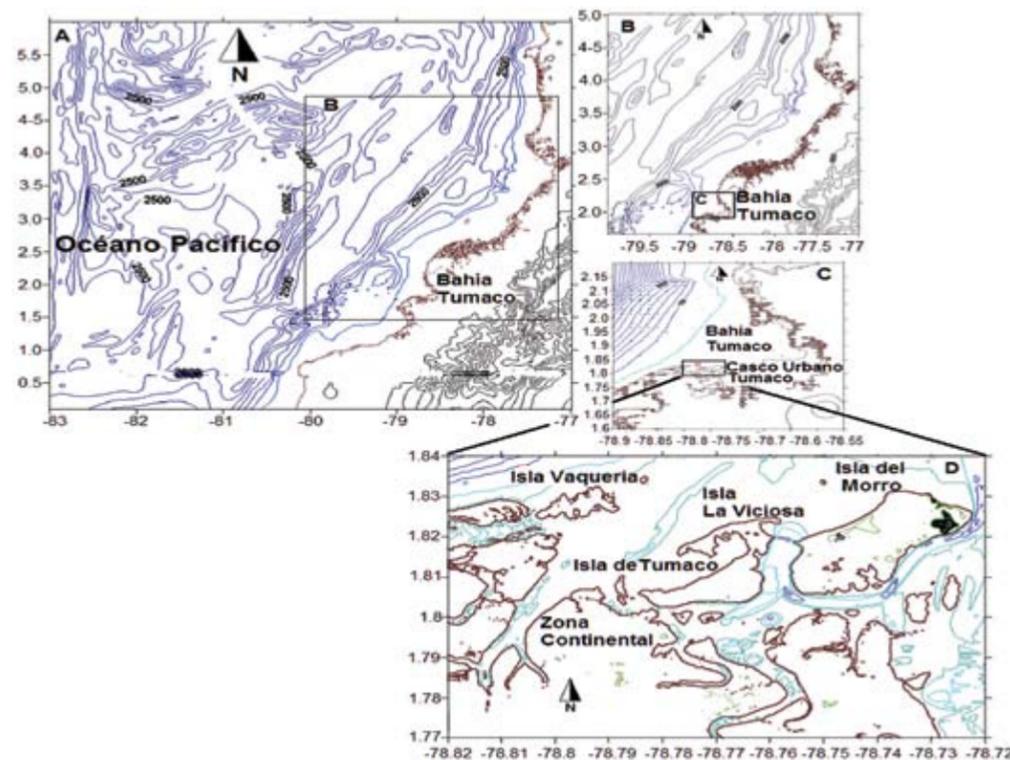


Figura 3. Mallas de cálculo que discretizan el dominio de integración.

Condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)

La estabilidad de la solución numérica se garantiza si cada una de las mallas cumple la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) [2] expresada en la ecuación (3):

$$\sqrt{2gh_{max}} \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 0.8 \tag{3}$$

Donde,

Δt , es el paso del tiempo en segundos.

Δx , es la resolución espacial de la malla.

h_{max} , es la profundidad máxima de la malla.

Esta condición se verificó para cada una de las mallas, obteniendo los resultados que ilustra la Tabla III.

Nivel de marea de referencia

En el Pacífico es importante asociar un nivel de marea a un evento de tsunami, debido a que la diferencia de nivel entre la pleamar y la bajamar durante mareas altas llega a ser mayor a 4 m [6]. Se evaluó la amenaza en situación de marea media y alta. Para lo cual el nivel de marea alta fue de 3,6 m, con un 94,2 % de probabilidad de no excedencia, y el de marea media fue de 2,2 m, con un 49,5 % de probabilidad de no excedencia en la zona de estudio [1].

Determinación de puntos de extracción de señales sintéticas

Para el área de estudio se seleccionaron ocho puntos de extracción de señales sintéticas de altura de la ola, con el fin de obtener información que permitiese evaluar la altura de ola y el tiempo de arribo de las mismas durante todo el transcurso de la modelación en lugares específicos. La posición de los puntos se indica en la Tabla IV y se aprecian en la Figura 4.

Tabla III. Condición CFL para las mallas utilizadas.

	Δx (m)	Δt (s)	h_{max} (m)	Condición CFL
Malla A	833,22	0,5	4217,2	0,173
Malla B	277,74	0,5	3385,4	0,529
Malla C	92,58	0,5	892,1	0,716
Malla D	30,83	0,5	31,66	0,405

Tabla IV. Posiciones de los mareogramas sintéticos en el área urbana de San Andrés de Tumaco.

Puntos Señal Sintética	Coordenadas	Sitio
P1	-78.7975°W; 1.8358°N	Isla Vaquería
P2	-78.7586°W; 1.8344°N	Playa Brim IV
P3	-78.7408°W; 1.8338°N	Playa de El Morro
P4	-78.7300°W; 1.8194°N	Dimar (Mareógrafo)
P5	-78.7611°W; 1.8033°N	Sector Muelle Turístico
P6	-78.7855°W; 1.8039°N	Puente Pindo
P7	-78.7811°W; 1.8139°N	Sector Avenida La Playa
P8	-78.7569°W; 1.8242°N	Isla La Viciosa, Playa El Bajito

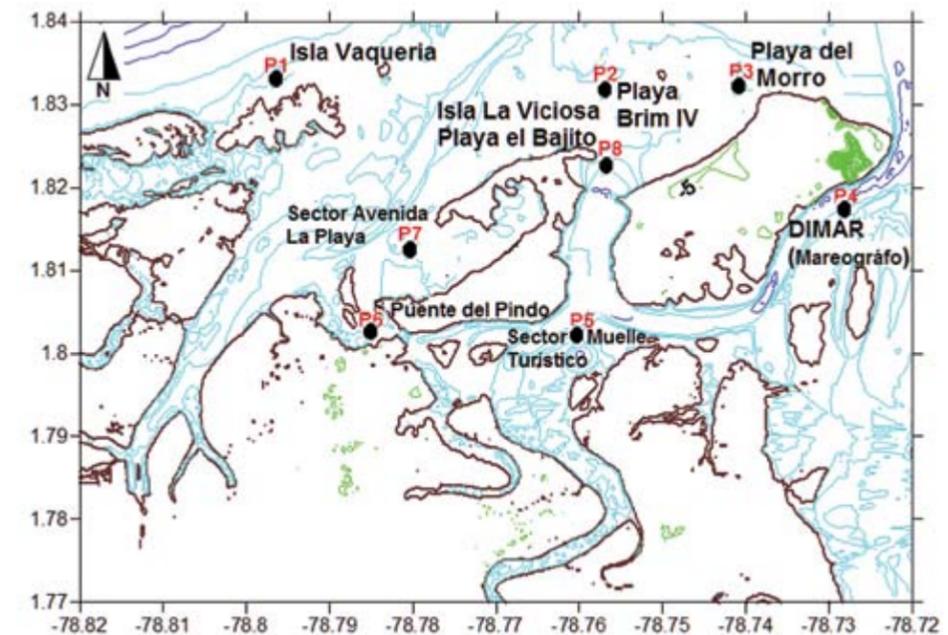


Figura 4. Ubicación puntos de extracción de señales sintéticas en el área urbana del municipio de San Andrés de Tumaco (P1-P8).

Con la ejecución de los modelos propuestos por Mansinha y Smylie (1971), Goto y Ogawa (1992) e Iwasaky y Mano (1979), integrados en el proyecto TIME, se obtuvieron como resultado la deformación inicial del terreno que representa el efecto cosísmico, la malla de inundación con la altura máxima de la lámina de agua inundante y señales sintéticas que permiten obtener información de tiempos de llegada y alturas de olas en puntos específicos en la zona de estudio, durante todo el periodo de simulación del evento.

RESULTADOS

Se presentan los resultados de los escenarios de simulación sólo para marea alta, ya que son los más extremos.

Escenario E1

La Figura 5 describe la inundación en la zona de estudio provocada por este escenario. La isla de Vaquería recibe impacto directo del tsunami, con olas próximas a los 2 m llegando en la parte de frente de costa de la isla. Las olas al llegar a la isla experimentan efectos de reflexión/refracción que atenúan la amplitud de las olas que llegan a la isla de Tumaco.

En el área urbana de San Andrés de Tumaco se produce una amplia inundación. La isla La Viciosa sufre la llegada de olas con alturas que van desde 1,4 a 1,8 m, provocando que sea anegada por completo con un nivel de inundación superior a 1,2 m de altura. En la isla de Tumaco se presentan olas entre 1 y 1,4m en la parte occidental, y entre 0,8 y 1 m en la parte oriental, solo una pequeña zona al nor-orienté queda sin inundar, en el resto de la Isla el nivel de inundación es superior a 1 m de altura.

Se observan olas con alturas próximas a 2 m que se agrupan en la parte occidental de la Isla de El Morro, sobre la playa turística y la playa de la actual Brigada IV de Infantería de Marina (antiguo Bafim 70); en la parte oriental se presentan olas con alturas entre 0,8 y 1,2 m. En la parte occidental de la Isla se presenta mayor nivel de inundación, ya que recibe el impacto director del tsunami; al oriente el nivel de lámina de agua inundante es superior a 1 m de altura, dejando zonas sin inundar. Al superponerse las olas de tsunami al estado de marea provocan un fuerte *run-up* al interior del borde costero, generando amplia inundación en las islas.

La zona continental, al estar resguarda por las islas, presenta la llegada de olas de menor amplitud entre 0,8 a 1 m de altura. Debido a la existencia de rellenos artificiales que elevan el terreno [3] algunas zonas no son inundadas; sin embargo, los terrenos bajos de la zona continental son anegados por completo debido a la lámina de agua inundante proveniente del desborde de esteros cercanos. Los tiempos de llegada de la primera ola para la zona de estudio en este escenario oscilan entre 15 minutos

para la isla de Vaquería y 20 minutos para la zona occidental de las islas La Viciosa, Tumaco y El Morro. Se estima un tiempo promedio de llegada del primer tren de olas al área urbana de Tumaco de 20 minutos, similar al presentando en [6] (Figura 6).

Este escenario presenta amplios sectores inundados en el área urbana de San Andrés de Tumaco, que junto al tiempo de llegada de la primera ola que en promedio es de 20 minutos (aun cuando los tiempos en los simulacros en algunos casos muestran tiempos de evacuación no mayores a 15 minutos [14]) permite identificar el escenario para la zona de estudio como "Muy fuerte", según la escala presentada en [7]. Escala descriptiva de la intensidad de un tsunami, que establece 6 grados de intensidad empezando desde "Muy suave" hasta "Desastroso".

Escenario E2

Se analizaron los resultados con el objetivo de evaluar el impacto del tsunami de 1979 con los parámetros macrosísmicos reportados por Ingeominas [13], llegando a tener una primera aproximación, ya que no todos los parámetros son reportados por la fuente. La Figura 7 describe la inundación en la zona de estudio provocada por este escenario. El panorama para la zona de estudio en este escenario es "Catastrófico", según la escala presentada en [7]. Se presentan alturas de ola cercanas a los 3 m en la parte occidental de las islas de Tumaco, La Viciosa y El Morro; y en la parte oriental de las mismas se exhiben alturas de ola que van desde los 1,5 a 2 m, anegando aproximadamente el 100 % del terreno, con un fuerte *run-up*.

La única zona que queda sin cubrir por la inundación es el cerro de El Morro (zona de color blanco en la isla de El Morro -parte superior derecha de la Figura 7-), el cual tiene una altura aproximada de 80 m [3]. En la zona continental se presentan alturas de olas entre 1 y 1,5 m, que producen una amplia inundación del terreno quedando pequeñas áreas sin inundar.

En cuanto a tiempos de llegada de la primera ola, se presenta un tiempo de 14 minutos para el punto ubicado en la isla Vaquería, y tiempos de 18 minutos para la parte occidental de las islas. Se estima un tiempo promedio de llegada del primer tren de olas al área urbana de Tumaco de 18 minutos (Figura 8).

Este escenario provoca la inundación de toda la zona de estudio exceptuando el cerro de El Morro, que sería la única opción de zona de encuentro, con sus limitaciones de accesibilidad y de área disponible de resguardo. El efecto del fuerte *run-up*, combinado con el tiempo de llegada del primer tren de olas, hace que este caso de simulación del evento real de tsunami de 1979 sea el de mayor amenaza.

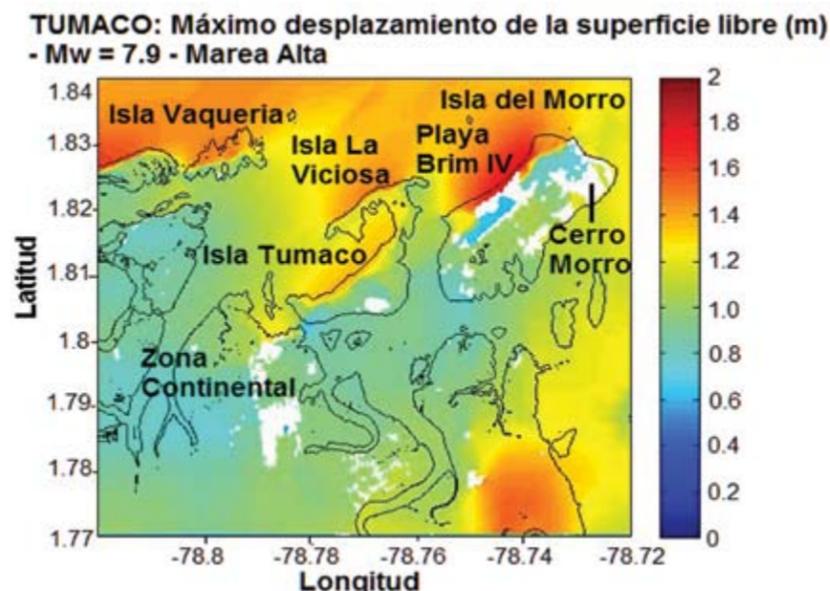


Figura 5. Altura y extensión horizontal de inundación en el área urbana Tumaco para el escenario E1, en condiciones de marea alta. La escala de colores indica la máxima altura (metros respecto al NMM) alcanzada por el tsunami. Las zonas en blanco indican terrenos que no son cubiertos por el agua.

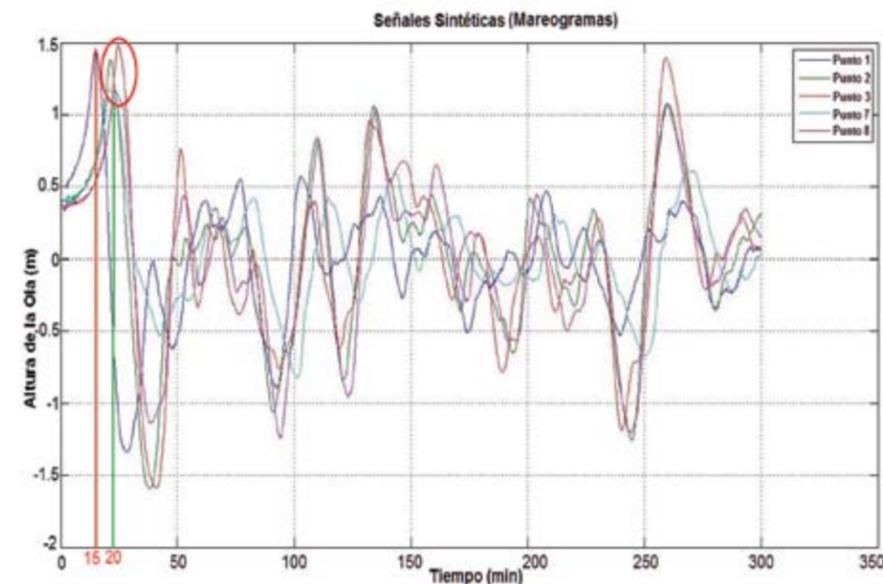


Figura 6. Señales sintéticas escenario E1, P1 isla Vaquería primer máximo en 15 minutos línea roja. P2, P3, P7 y P8 occidente de las islas de La Viciosa, Tumaco y El Morro, promediando primer máximo en 20 minutos círculo rojo y línea verde. Los tiempos se miden desde el origen del sismo, los puntos se muestran en la Figura 4.

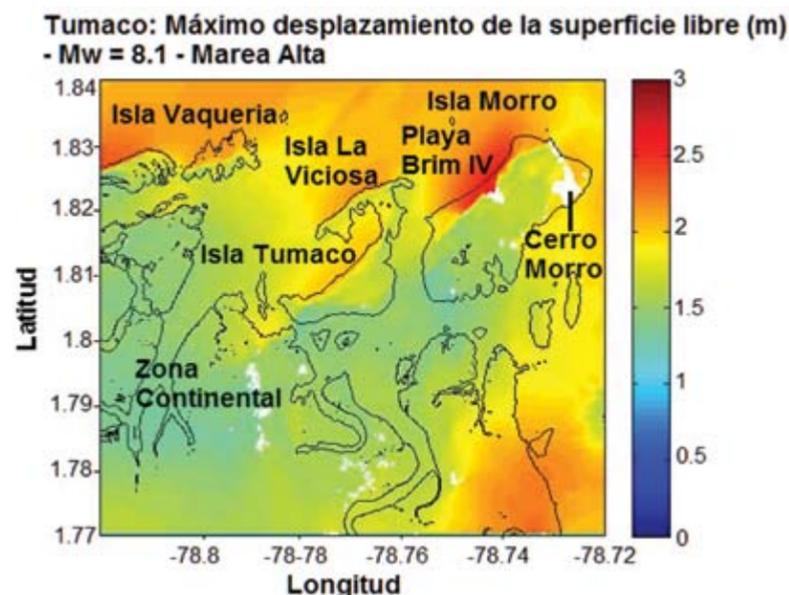


Figura 7. Altura y extensión horizontal de inundación en el área urbana Tumaco para el escenario E2, en condiciones de marea alta. La escala de colores indica la máxima altura (metros respecto al NMM) alcanzada por el tsunami. Las zonas en blanco indican terrenos que no son cubiertos por el agua.

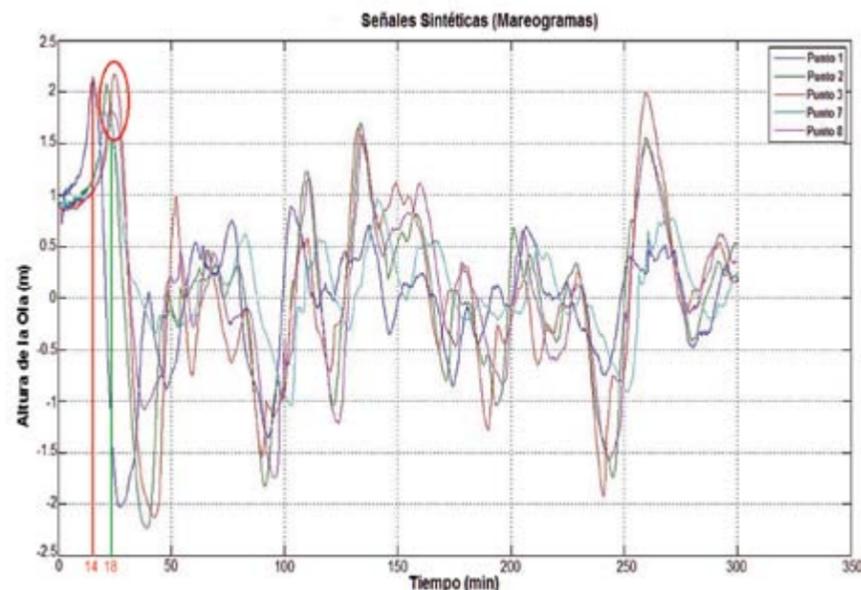


Figura 8. Señales sintéticas escenario E2, P1 isla Vaquería primer máximo en 14 minutos línea roja. P2, P3, P7 y P8 occidente de las Islas de La Viciosa, Tumaco y El Morro promediando primer máximo en 18 minutos círculo rojo y línea verde. Los tiempos se miden desde el origen del sismo, los puntos se muestran en la Figura 4.

DISCUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos al modelar los escenarios del evento real de tsunami de 1979 se estimó la amenaza por tsunami en la zona de estudio. Los resultados muestran que el escenario con mayor proporción de zonas inundadas y menor tiempo promedio de arribo de la primera ola de tsunami es el escenario E2, el cual tiene la mayor magnitud sísmica.

Esto era de esperarse ya que la magnitud sísmica es la variable que más influye en la capacidad de inundación y en la velocidad de las ondas de un tsunami [2] [4]. Las diferencias entre los resultados de los escenarios E1 y E2 en cuanto a la afectación por inundación en la zona de estudio obedece a la diferencia en los planos de falla, siendo mayor la deformación cosísmica causada por el escenario E2.

El efecto cosísmico genera la deformación vertical del lecho marino, transmitiendo de forma instantánea la perturbación a la columna de agua [10], al comparar las señales sintéticas de las figuras 6 y 8 se observa la diferencia en las amplitudes en el tiempo "zero"; esto es causa de la relación directa de la magnitud del sismo precursor con la deformación de fondo causada por el efecto cosísmico.

Trabajos anteriores [6] [12] evidencian un descenso del nivel del mar antes de la llegada de la primera ola, sin embargo en [1] se presenta una sobre elevación inicial causa de la deformación generada por el sismo.

Se exhorta a estudiar a fondo los efectos causados en la modelación por causa del efecto cosísmico, dados los sismos precursores cercanos a la zona de estudio.

Si el evento de 1979 se presentara en la actualidad con las características del escenario E2, la única zona que no presentaría inundación sería el cerro de El Morro, lo anterior implica que E2 sea considerado el escenario de mayor amenaza. Sin embargo, teniendo en cuenta que

los parámetros de modelación del escenario E1 son idénticos a los del escenario que se utilizó para la creación del mapa actual de inundación por tsunami del municipio [1] y los parámetros macrosísmicos del escenario E2 no son totalmente documentados por la fuente, se propone utilizar los resultados de E1 (figuras 4 y 5) como base para la actualización del mapa de inundación por tsunami de origen cercano en el área urbana de San Andrés de Tumaco y la definición de los tiempos de arribo de la primera ola de tsunami en la zona de estudio.

La diferencia en los resultados de la presente investigación con los encontrados en estudios realizados con antelación [1] [6] [12] respecto a la inundación del área de estudio se da por los cambios geomorfológicos debidos al transporte de sedimentos ocurrido en el lapso de tiempo entre el presente estudio y los anteriores, además de la precisión y el detalle de los datos utilizados para crear las mallas que discretizan el dominio de cálculo donde se ejecutaron los modelos que simulan las etapas del tsunami de 1979.

El presente estudio contó con batimetrías adquiridas con instrumental de última generación (Multihaz), con el que se realizaron levantamientos de detalle, además de datos LiDAR que determinan con precisión centimétrica la altura del terreno. Se creó un modelo de elevación de digital de alta precisión en el valor de los datos que lo componen, con resolución espacial de 30 m que dadas las características de la zona de estudio es adecuado para la representación de las principales geoformas costeras y del terreno.

La profundidad del mar y la altura del terreno son variables básicas dentro del proceso de modelamiento numérico de tsunami, por lo que la validez de los resultados obtenidos está relacionada directamente con la calidad, precisión y exactitud de esta información [2].

Las limitaciones en la presente investigación radican principalmente en la ausencia de datos mareográficos que permitan validar la altura de las olas que llegaron a la zona estudio en el tsunami de 1979, lo anterior sumado a la falta de estudios técnicos que permitirían validar la extensión o *run-up* del tsunami.

Comparación mapas de inundación por tsunami de origen cercano en San Andrés de Tumaco 2004 y 2012

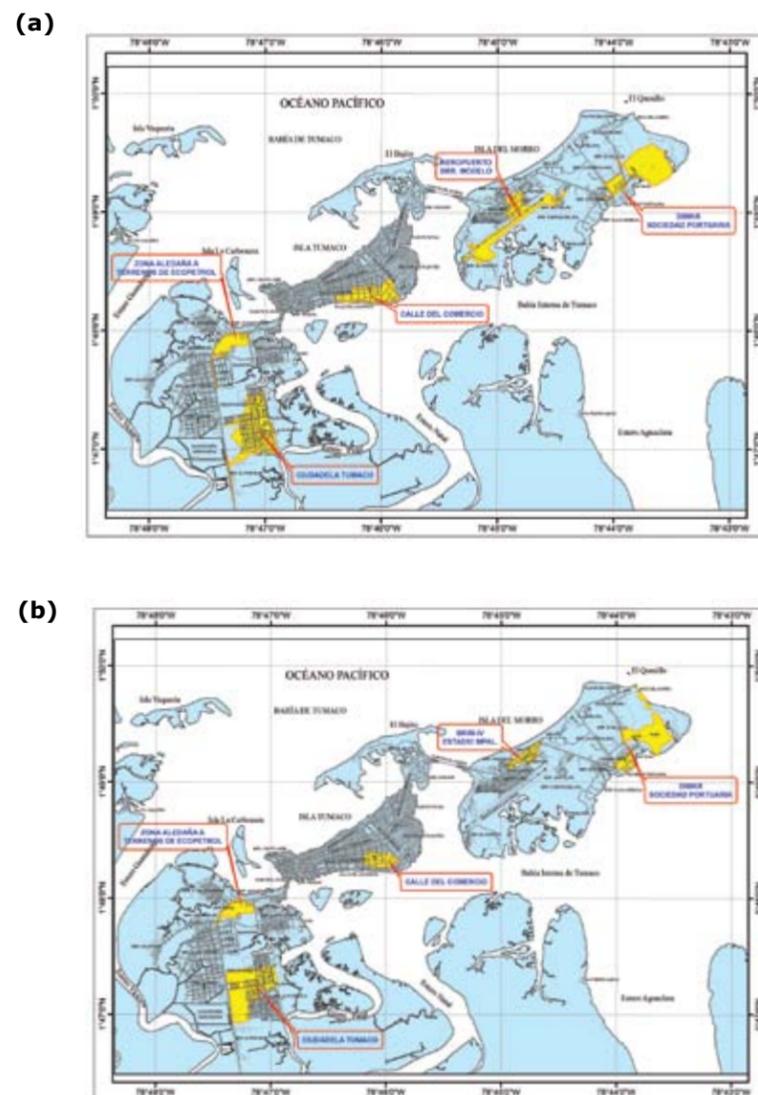


Figura 9. (a) Mapa de inundación por tsunami actual para la zona de estudio, elaborado en 2004. **(b)** Mapa de inundación por tsunami para la zona de estudio propuesto en esta investigación resultado de la simulación del escenario E1, elaborado en 2012.

Al realizar una comparación entre los mapas de inundación en el área urbana de San Andrés de Tumaco se identificaron los cambios que se presentan en las áreas no inundadas. Estas áreas son denominadas zonas de encuentro o de menor exposición [14]. En las figuras 9a y 9b se aprecian cinco zonas de encuentro, pero con diferencias significativas, lo cual

se puede fundamentar en el detalle de la información batimétrica (Multihaz) y altimétrica (LiDAR) utilizada en la modelación de 2012, que modifica tanto la generación como la propagación e inundación que provoca el evento de tsunami [8], originando cambios marcados entre los mapas de 2004 y 2012 en cuanto a inundación en la zona de estudio.

Para la isla de El Morro en ambos mapas se identifican dos zonas de encuentro, denominadas Dimar-Sociedad Portuaria (Z1) y Aeropuerto La Florida (Z2). Z1 comprende en el mapa 2004 parte de la Avenida 20 de Julio, Dimar (terreno edificio del CCCP, canchas de tenis y voleibol) y Corponariño (terreno edificio y terrenos aledaños). En el mapa 2012, Z1 se reduce a las canchas de tenis y voleibol de Dimar; Corponariño sería inundado por completo y, por el contrario, parte de la Sociedad Portuaria y el Muelle Pesquero serían incluidos dentro de Z1 (exceptuando el muelle de atraque de embarcaciones).

Z2 que comprende en el mapa del 2004 el Aeropuerto La Florida y barrios aledaños, es inundada por completo en el mapa de 2012. En el presente estudio, Z2 se denomina BRIM IV conformada por las áreas no inundadas de la Brigada IV de Infantería de Marina (casas fiscales) y el Estadio Domingo Tumaco González.

En la isla de Tumaco, en ambos mapas se identifica una zona de encuentro, con ubicación similar en la parte nor-oriental de la isla. La zona de encuentro 3 es denominada Calle del Comercio (Z3), la cual se reduce considerablemente. Como se observa en la Figura 9b, la disminución de Z3 es significativa, aumentando el área de inundación en el mapa 2012 aproximadamente en 100 000 m² comparado con el área de inundación del mapa 2004.

En el continente se identifican dos zonas de encuentro denominadas Terrenos Aledaños Terminal Ecopetrol (Z4) y Ciudadela (Z5). En ambos mapas tienen igual ubicación, pero cambian de tamaño. Z4 que comprende en el mapa de 2004 los sectores de la cancha de Texas y terrenos aledaños al Terminal de Ecopetrol, cambia en el mapa de 2012 a cubrir solo parte de los terrenos aledaños a Ecopetrol. Z5 que en el mapa 2004 contiene en su totalidad la urbanización La Ciudadela y barrios aledaños (barrio Cándamo y barrio Nuevo Horizonte, entre otros), cambia en el mapa 2012 presentando inundación en el Barrio Cándamo y en una parte importante de la urbanización La Ciudadela.

De esta manera el mapa de inundación por tsunami de origen cercano para el área urbana del municipio de San Andrés de Tumaco del presente estudio establece el mismo número de zonas de encuentro que el mapa de 2004, pero cambia en general el tamaño de las zonas en cuatro casos y en un caso, Z2, cambia de ubicación.

El mapa 2012 se presenta como una aproximación de un evento real, pero expone una mayor amenaza planteando la actualización del plan de prevención y mitigación de riesgo por tsunami para el municipio.

CONCLUSIONES

El evento real de tsunami simulado con base en el escenario E1 en estado de marea media, aun cuando presenta alturas de ola cercanas a los 2 m, no genera amplias zonas de inundación en el área urbana de San Andrés de Tumaco, situación que permite establecer que la zona de estudio puede soportar un evento de tsunami con características similares al de 1979 en estado de marea media. Por el contrario, si el evento es recreado en marea alta, aunque las alturas de ola máximas son similares, el *run-up* es mayor, provocando amplias zonas inundadas.

El escenario E2 en estado de marea media provoca inundación importante en la zona de estudio, pero permite resistir a un evento de este tipo. Sin embargo, si el evento de tsunami se presenta en marea alta causa un efecto "Catastrófico" en cuanto a inundación, que va desde inundación casi total, quedando pequeños islotes en la isla de El Morro a inundación total en el resto de la zona de estudio. Esto indica que sismos precursores de tsunami con magnitud sísmica igual o mayor a Mw=8,1 inundan aproximadamente el 100 % del área urbana del municipio de San Andrés de Tumaco.

La información LiDAR de alta resolución en conjunto con la batimetría de detalle en la zona de estudio, permitieron establecer con mayor precisión las zonas de inundación en caso de un tsunami con características similares al evento real de 1979, toda vez que se puede representar con mayor precisión la altimetría del terreno y la morfología del borde costero y su efecto en la transformación de la onda de tsunami en la zona de transición agua-tierra, simulando de mejor manera la altura y extensión de la inundación o *run-up*.

El mapa 2012 de inundación por tsunami de origen cercano para el área urbana del municipio de San Andrés de Tumaco servirá como herramienta de apoyo a los entes encargados de la gestión del riesgo y ordenamiento territorial en el municipio, toda vez que define los sectores con mayor y menor amenaza ante un eventual tsunami con características similares al de 1979 y sirve como herramienta de soporte para que se tomen medidas, como la reubicación de la población que se encuentra en sitios con mayor exposición, o se estudie la posibilidad de implementar soluciones como el desalojo vertical.

Teniendo en cuenta la disminución en área de las zonas de encuentro 100 000 m² en la Isla de Tumaco, el escaso tiempo de llegada del tsunami que es de 20 minutos y la alta población en la zona de estudio 179 005 habitantes, según proyección del Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia (DANE) 2010, plantea a las entidades encargadas de la gestión del riesgo en el municipio, actualizar y optimizar el plan de evacuación y respuesta ante tsunami en el área de estudio. Además, de iniciar trabajos de mitigación de los impactos de un tsunami realizando proyectos de regeneración o construcción de barreras naturales que evidencian eficiente protección frente a un evento de tsunami.

LITERATURA CITADA

- [1] Cardona, Y. Modelación de tsunami en la costa Pacífica colombiana, caso de aplicación Bahía de Tumaco. Tesis de Grado Magister, Universidad Nacional del Colombia, 2005.
- [2] Restrepo, J.C. & L.J. Otero. 2007. Modelación numérica de eventos tsunamigénicos en la Cuenca Pacífica Colombiana-Bahía de Buenaventura. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31(120): 363- 377, 2007. ISSN 0370-3908.
- [3] Cardonal, Y., Toro, F., Vélez, J. y Otero, L. 2007. Estimación de la amenaza por inundación generada por ondas de tsunami considerando la altura y velocidad de la lámina de agua inundante para el municipio de Tumaco. Boletín Científico CCCP, (14): 19-30.
- [4] Bastidas, M. y Puentes, M. Estimación del riesgo por tsunami de origen cercano en la Bahía de Buenaventura. Informe final CCCP 2008.
- [5] Caicedo, J., Martinelli, B., Meyer, H. y Reyna, J. 1996. Simulaciones numéricas de propagación de tsunami para la costa Pacífica de Colombia. X Seminario Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar., Academia de Ciencias Exactas: 1-14.
- [6] Quiceno, A. y Ortiz, M., 2001. Evaluación del impacto de tsunami en el litoral Pacífico colombiano. Parte I (Región de Tumaco). Boletín Científico CCCP, N° 8: 5-14.
- [7] Sierra, P. y Pau, J. 2010. Análisis de la generación y propagación de tsunami en la costa Atlántica española. Tesis de Grado, Universidad Politécnica de de Catalunya 2010.
- [8] Murashima, Y., Takeuchi, H., Imamura, F., Koshimura, S., Fujiwara, K. y Suzuki, T. *Study on Topographic Model Using LIDAR for Tsunami Simulation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008.*
- [9] Lagos, M. y Gutiérrez, D., 2005. Simulación del Tsunami de 1960 en un estuario del centro-sur de Chile. Revista Geográfica, Norte Grande, julio, número 03. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile: pp. 5-18.
- [10] Mansinha, L. y Smylie, D.E. 1971. *The displacement of the earthquake fault model, Bull Seismol Soc Smeri. 61, 1433-1400.*
- [11] Goto, C. y Ogawa, Y. 1997. *Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. IUGG/IOC TIME Project. Unesco. 28 p.*
- [12] Cardona, Y., 2004. Análisis del arribo de ondas de tsunami a las poblaciones de la Bahía de Tumaco a través de señales sintéticas. Boletín Científico CCCP, N° 11: 42-49.
- [13] Ingeominas. 2012. [En línea]: Sismicidad Histórica de Colombia del Instituto Colombiano de Geología y Minería. Disponible en: <http://www.ingegominas.gov.co/>
- [14] Comisión Colombiana del Océano. 2007. Política Nacional de los Océanos y los Espacios costeros (PNOEC). URL: <http://www.cco.gov.co/anterior/politicooficial.pdf>
- [15] DANE 2010