

Evaluación del Efecto de la Isla Barrera El Guano frente a la Acción de Tsunamis en Tumaco

Luis Jesús Otero Díaz¹
Ernesto Mauricio González Rodríguez²

¹Área de Modelado Integral de Zonas Costeras, Centro Control Contaminación del Pacífico - CCCP
Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia
Tél: +57 (2) 727 26 37, Fax: +57 (2) 727 11 80, AA. 187
e-mail: cccp.webmaster@dimarnet.mil.co
e-mail: lotero@dimarnet.mil.co

²Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria.
39005, Santander, España
e-mail: gonzalere@unican.es

Otero, L. y M. González. 2005. Evaluación del Efecto de la Isla Barrera El Guano frente a la Acción de Tsunamis en Tumaco. Boletín Científico CCCP, (12): 49-61.

Recibido en junio de 2005; aceptado en agosto de 2005

RESUMEN

La población de San Andrés Tumaco, en Colombia, ha sufrido el impacto de tsunamis de gran magnitud, los cuales han causado graves daños y pérdidas de vidas humanas en la región. El más reciente tsunami, ocurrido el 12 de diciembre de 1979 (M_w 8.2), afectó especialmente a la población; no obstante, existe la evidencia de que el desastre fue minimizado gracias a la existencia de la isla barrera El Guano, cordón litoral de arena, ubicado frente a la isla de Tumaco, que desapareció durante el evento. En el presente trabajo se realizó un estudio comparativo en la bahía de Tumaco entre la situación actual (sin isla barrera) y la anterior a 1979 (con isla barrera) frente a la acción de tsunamis. Este análisis se desarrolló mediante la identificación de mecanismos focales de sismos tsunamigénicos y la aplicación de un modelo numérico de generación y propagación de tsunamis. Los resultados de las simulaciones de tsunami para Tumaco mostraron que, en la situación actual, esta zona es vulnerable al impacto e inundación por tsunamis de fuente cercana. En la situación con isla barrera, se comprobó que durante el tsunami de 1979 este elemento redujo notablemente el flujo de energía y la cota de inundación de las ondas de tsunami en Tumaco. Sin embargo, el impacto hubiera sido mucho mayor si este tsunami hubiera ocurrido durante un nivel de pleamar. A efectos de reducir el riesgo por inundación debido a tsunamis en Tumaco, una alternativa propuesta en este trabajo fue propiciar el estudio de impactos de la regeneración natural de la antigua isla barrera El Guano, generando así una mayor protección de la ciudad.

PALABRAS CLAVE: Tsunamis, isla barrera, inundación, Tumaco, pleamar, modelo numérico, regeneración.

ABSTRACT

The village of San Andres de Tumaco, in Colombia, has suffer the impact of great magnitude tsunami events, which have caused serious damage and death in the area. The last tsunami, occurred on December 12, 1979 (M_w 8.2), affected the population of Tumaco in particular. However, it is believed that the disaster was lessened by the existence of Guano barrier island, a littoral sand island that disappeared in the event, and located in front of city of Tumaco. In this work a comparative study of tsunami action in the Tumaco Bay is carried out, taking the present situation (without barrier island) and the situation previous to 1979 (with barrier island), in order to consider the viability of regenerating the old Guano barrier island as a protective element for the population in this area. This analysis was carried out by means of the identification of earthquake parameters and focal mechanisms of tsunami generation in the zone, the application of a numerical model of tsunami generation and propagation and the evaluation of tsunami action on the islands of Tumaco. The results of the simulations for Tumaco showed that in the present situation, this zone is vulnerable to the impact and flood by tsunamis from a near source. It was proven that barrier island considerably reduced the energy flow and the flooding level of the tsunami waves upon Tumaco in the 1979 event. However, if this tsunami had occurred during a higher tide, the impact would have been greater. In order to reduce flooding risk due to tsunamis upon the city of Tumaco, the alternative proposed in this paper is to regenerate and modify the morphology of the old Guano barrier island to provide better protection for the city.

KEY WORDS: Tsunamis, barrier island, flood, Tumaco, higher tide, numerical model, regenerate.

INTRODUCCIÓN

Cuando la fuente de un sismo está situada total o parcialmente bajo el mar existe el riesgo de generación de ondas gravitacionales de gran período y contenido energético, las cuales viajan a gran velocidad largas distancias provocando, en algunos de los casos, graves daños en vidas y propiedades ubicadas en zonas costeras. Dichas ondas se conocen con el nombre de tsunamis, término japonés que significa 'ola en puertos'. Afortunadamente, no todo movimiento sísmico en el mar genera un tsunami; su origen depende de los parámetros del foco sísmico, como son: el tipo de desplazamiento tectónico, el cual debe ser generalmente un movimiento vertical del fondo tipo falla normal o inversa; magnitud del sismo, ($M_w > 7$); profundidad del foco, ($d_f < 50$ km), y extensión de la fuente ($L > 100$ km) (Iida, 1963; Iida, 1970; Wiegel, 1970).

El bloque norte de Los Andes es una región de intensa actividad sísmológica, en particular la franja sísmica ubicada frente a litoral Pacífico sur de Colombia y norte de Ecuador. En esta zona, durante el Siglo XX, se produjeron seis grandes terremotos con $M_w > 7$. El más grande, ocurrido el 31 de enero de 1906 ($M_w > 8.6$), tuvo una longitud de ruptura estimada de 500 km, parcialmente reactivada en secuencia de sur a norte en los eventos del 14 de mayo de 1942 ($M_w > 7$), 19 de enero de 1958 ($M_w > 7.7$) y el 12 de diciembre de 1979 ($M_w > 8.2$) (Mendoza y Dewey, 1984). Estos

terremotos generaron tsunamis que causaron graves daños y pérdida de vidas humanas en la región costera del litoral Pacífico colombiano-ecuatoriano, particularmente el evento de 1979 que afectó a gran parte de los habitantes de la bahía de Tumaco (Quiceno y Ortiz, 2001).

La alta sismicidad de la región es producto de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramericana, especialmente en donde la dorsal Carnegie subduce debajo de Ecuador (Figura 1).

A raíz del tsunami de 1979 se han orientado esfuerzos, sin mucho éxito, para implementar soluciones que minimicen los riesgos a que se encuentran expuestos los 100 000 habitantes que conforman la población de Tumaco. Es por ello que una alternativa que se exploró en el presente estudio fue la regeneración de la antigua isla barrera El Guano (Figura 2); desaparecida durante el tsunami de 1979 y que, precisamente, durante dicho evento se cree desempeñó un papel protector reduciendo sustancialmente la magnitud del desastre.

Teniendo en cuenta que los terremotos con focos submarinos son la principal fuente generadora de grandes tsunamis, es importante analizar la sísmología, la tectónica y los mecanismos focales dominantes en la zona, para establecer los parámetros de las fallas y mecanismos focales de generación de tsunamis en el litoral sur del Pacífico colombiano.

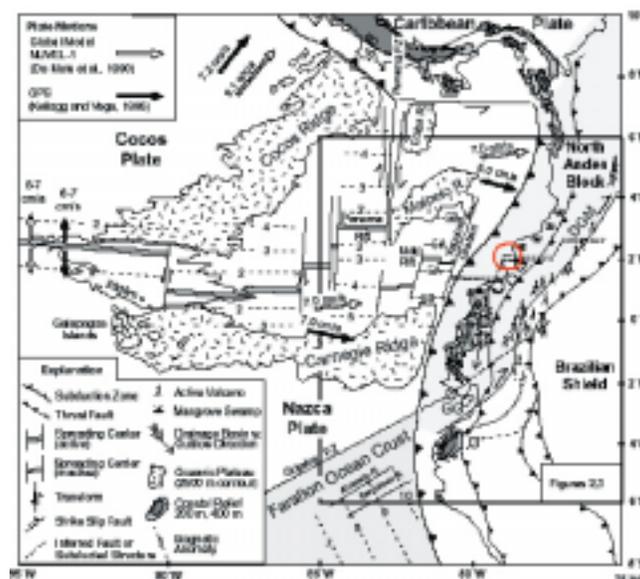


Figura 1. Movimiento relativo de las placas y zona de subducción. El círculo rojo indica la ubicación de la bahía de Tumaco (Fuente: Gutsher *et al.*, 1999).

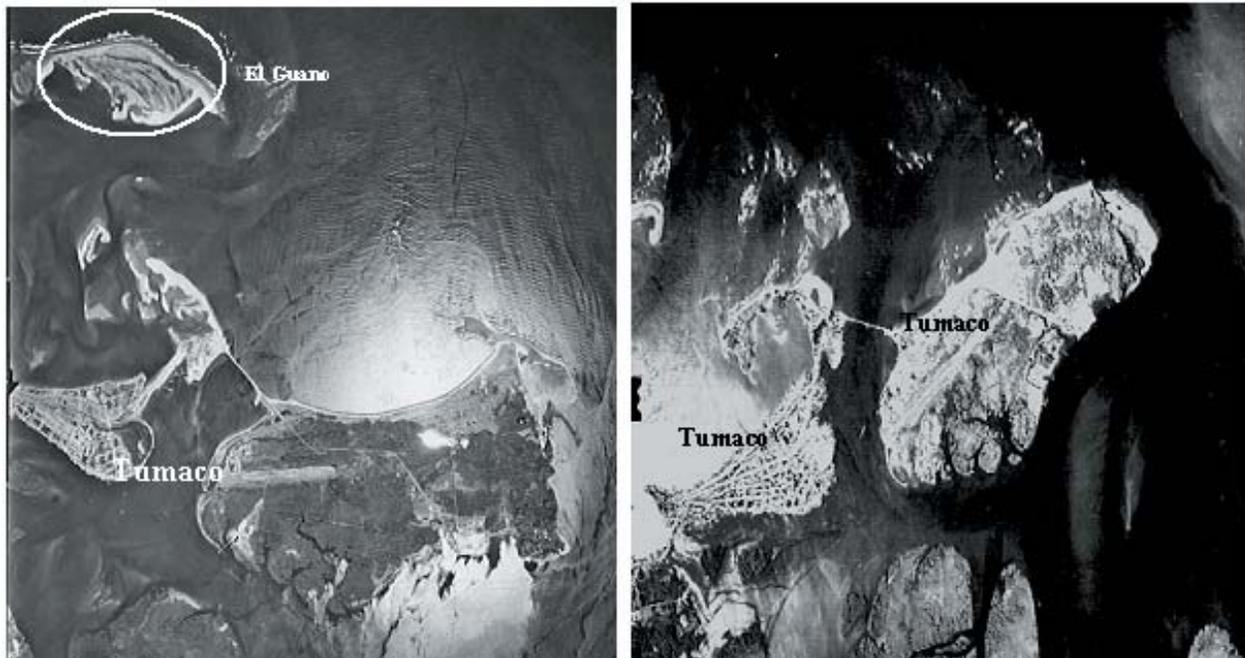


Figura 2. Localización de la isla barrera El Guano antes del tsunami de 1979 (izq.) y situación actual (der.).

ÁREA DE ESTUDIO

Sismicidad y tectónica de placas

Gutsher *et al.* (1999) presenta una zonificación del litoral Pacífico colombiano-ecuatoriano tomando en cuenta distintos patrones de sismicidad y actividad volcánica (Hall y Wood, 1985). En la Figura 3 se ilustran cuatro regiones de norte a sur:

* Región 1, sección A-A':

Presenta fallas superficiales dextrales transcurrentes y fallas normales superficiales. En esta región no se han registrado tsunamis, debido a que la actividad sísmica se concentra en profundidades mayores a 50 km.

* Región 2, sección B-B':

Entre los 2.5° N y 1° S, con una actividad sísmica baja en las profundidades intermedias, concentrándose en profundidades menores a 40 km. En esta región se encuentra ubicada la bahía de Tumaco y es la zona en donde se han generado los tsunamis que han afectado a la costa del litoral sur del Pacífico colombiano, debido a la ubicación de los epicentros a profundidades superficiales (<50 km). Las fallas son inversas superficiales en la zona de subducción.

* Región 3, sección C-C':

Las fallas presentes en esta zona son dextrales transcurrentes en la placa superior.

* Región 4, sección D-D':

Las fallas en esta zona son normales profundas.

Interpretación patrón sismotectónico

Gutsher *et al.* (1999) propone que la prolongación de la dorsal Carnegie ha estado en subducción por al menos dos millones de años hasta colocarse debajo de la cordillera de los Andes, a 400 km de la fosa Colombia. La colisión de la dorsal Carnegie parece haber afectado el acople entre las placas de Nazca y la Suramericana.

Cuatro grandes terremotos han ocurrido en el flanco norte de la colisión (1906, 1942, 1958 y 1979); no obstante, ninguno de estos eventos parece haber provocado ruptura en la dorsal. Por ello esta zona se ha identificado como un área importante de generación de tsunamis, de hecho cada uno de los eventos mencionados produjo un episodio tsunamigénico.

La interpretación de los patrones sismotectónicos y la interacción entre las placas confirman la existencia de una zona de subducción de gran actividad al norte de la dorsal Carnegie,

debido a la liberación de energía causada por sus movimientos hacia el este; por lo que es de esperarse que ocurran sismos de gran magnitud que generen tsunamis.

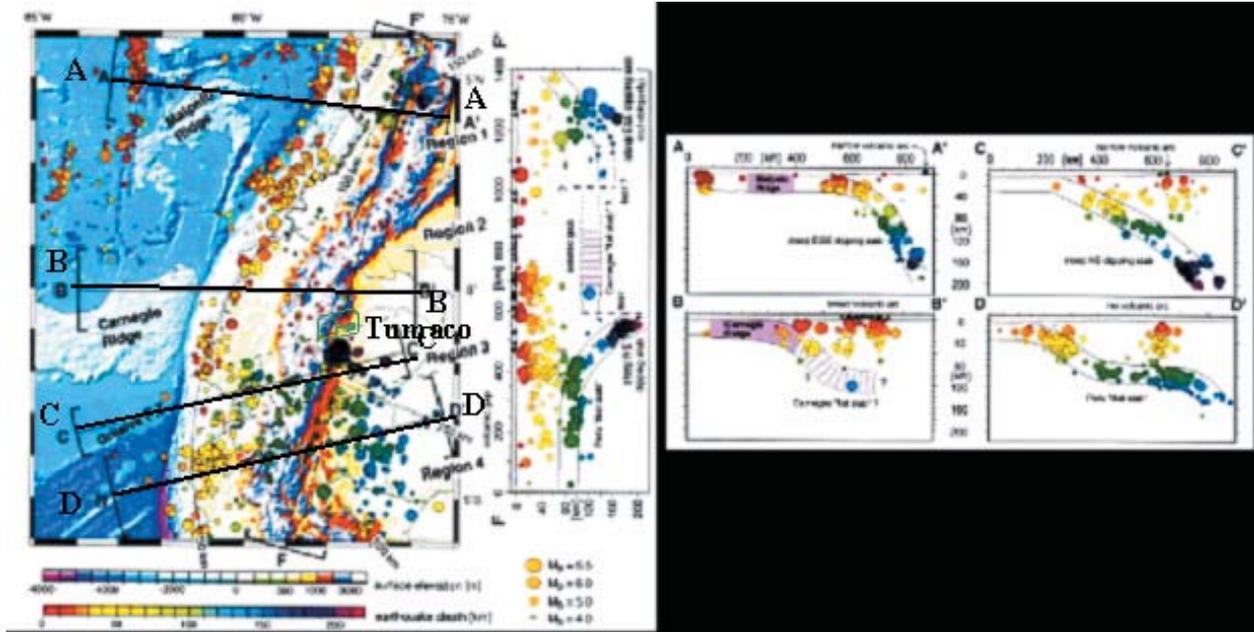


Figura 3. Delimitación Pacífico colombo-ecuadoriano acuerdo patrón sísmico histórico (Fuente: Gutsher *et al.*, 1999).

Parámetros sísmicos y mecanismos focales de generación de tsunamis en el Pacífico sur colombiano

El parámetro de la fuente sísmica que más estrechamente se relaciona con su potencial tsunamigénico es el momento sísmico M_0 (Kanamori y Anderson, 1975), el cual cuantifica la energía sísmica liberada. Para el caso del tsunami de 1979, cuya magnitud de momento se estimó en $M_w = 8.2$, el momento sísmico fue de 9.02×10^{20} Newton-m, (Engdahl y Villaseñor, 2002), con una longitud de ruptura L de 180 km (Beck y Ruff, 1984). Estos mismos autores proponen que el desplazamiento vertical promedio de la falla fue de 5 m. En cuanto a los mecanismos focales, Engdahl *et al.* (1998) revisaron y relocalizaron la sismicidad global, entre 1964 y 1995, mejorando las coordenadas hipocentrales y soluciones de plano de falla de los distintos catálogos sísmicos. En dicho estudio se establece que el sismo de 1979 tuvo las siguientes características focales expuestas en la Tabla I.

Tabla I. Características focales del sismo de 1979.

Características sismo de 1979	
Rumbo	Rumbo $\theta = 30^\circ$
Echado	$\delta = 16^\circ$
Buzamiento	$\lambda = 118^\circ$
Profundidad	$h_0 = 26.6$ km

Estos mecanismos focales son similares a los sismos que generaron los tsunamis de 1906, 1942 y 1958 (Mendoza y Dewey, 1984; Beck y Ruff, 1984; Swenson y Beck, 1996).

Mendoza y Dewey (1984) y Collot *et al.* (2002) muestran que existen dos segmentos en la zona de subducción entre las placas tectónicas Nazca y Pacífico, paralelos entre sí, donde se concentra la mayor actividad sísmica de la franja colombo-ecuadoriana, siguiendo un mismo patrón en dirección NE, zona donde también se han generado los epicentros de los tsunamis históricos (Figura 4a).

Con base en los modelos geodinámicos; mecanismos focales y sismicidad de la zona, y la liberación de energía en el área de subducción, que ha ido generando terremotos

y tsunamis desde el SW al NE, se han identificado seis potenciales fuentes generadoras de tsunamis en cercanías de Tumaco (Figura 4b).

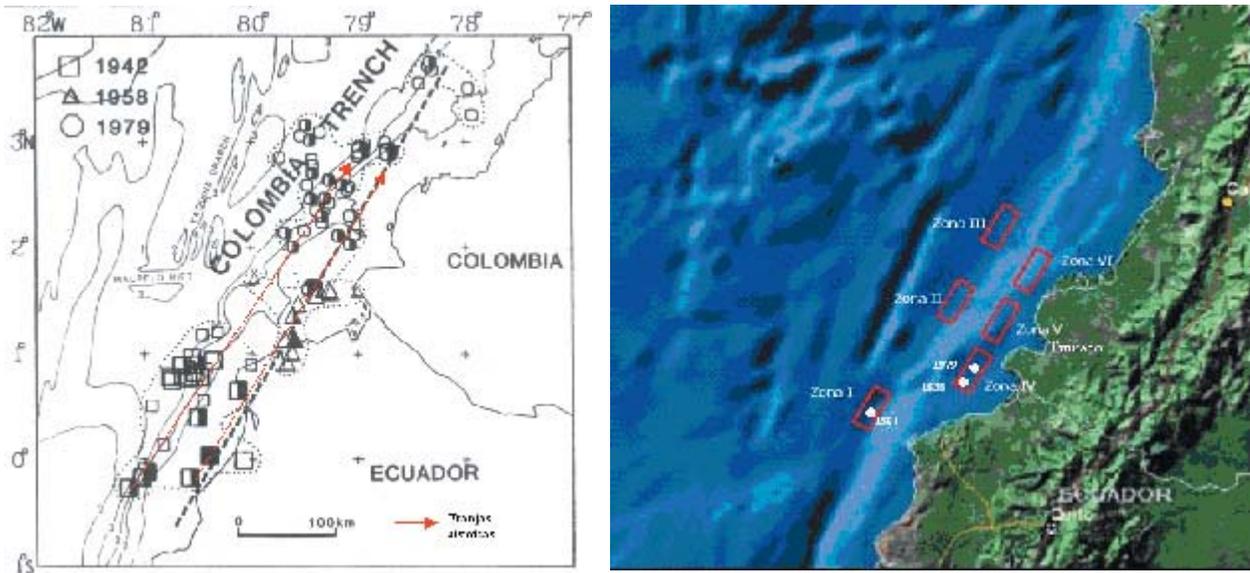


Figura 4. (a) Distribución espacial sismológica. (b) Potenciales zonas de generación y epicentros de tsunamis históricos.

METODOLOGÍA

Simulación numérica de eventos de tsunami

Una vez se han identificado las potenciales fuentes de generación de tsunamis y sus mecanismos focales de influencia sobre la bahía de Tumaco, se procede a simular eventos históricos y futuros, para lo cual es necesario un modelo numérico que permita estimar el impacto de los tsunamis en el área de estudio.

Modelo numérico y su calibración

En el presente trabajo se emplea el modelo numérico COMCOT (Cornell Multigrid Coupled Tsunami Model) (Liu *et al.*, 1995). Este es un modelo acoplado que genera las ondas en la superficie y al mismo tiempo las propaga, resolviendo numéricamente las ecuaciones de ondas largas (no-lineales y no-dispersivas) sobre tres mallas embebidas entre sí.

Para la generación de las ondas de tsunami, el COMCOT adapta el modelo de deformación de fallas inclinadas propuesto por Mansinha y Smyle

(1971), asumiendo que la deformación instantánea de la superficie del océano es igual a la deformación del lecho marino.

En el modelo COMCOT la aproximación hidrostática, la consideración de un movimiento barotrópico y la suposición de que las velocidades horizontales son constantes a lo largo de la dirección vertical, reducen las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento a las ecuaciones integradas de onda larga:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \tag{3}$$

donde

t : es el tiempo
 η : representa el desplazamiento vertical de la superficie del agua respecto del nivel de referencia
 g : es la aceleración gravitacional
 h : es la profundidad media de la columna de agua
 $D = (\eta + h)$: es la profundidad instantánea de la columna de agua
 M y N : son los flujos de descarga en las direcciones longitudinal (x) y longitudinal (y), respectivamente
 τ_x/ρ y τ_y/ρ : representan la fricción con el fondo en las direcciones x e y .

Para resolver el sistema de ecuaciones bidimensionales de movimiento se emplea el esquema de salto de rana (Leap - Frog). Este método es un esquema de diferencias centrales con un error de truncación de segundo orden.

Este modelo fue validado y calibrado a partir del tsunami generado en Argelia el 21 de mayo de 2003, que afectó las islas Baleares y el litoral mediterráneo español, teniendo en cuenta que se contaba con registros mareográficos de Ibiza y Barcelona. La magnitud del sismo fue de $M_w = 6.9$ y los mecanismos focales fueron suministrados por el Instituto Geográfico Español,

IGN. Para el cálculo de las dimensiones del área de ruptura de la falla generadora del tsunami se emplearon las relaciones propuestas por Wells y Coppersmith (1994), que relaciona la magnitud de momento M_w con el área de ruptura A_r (km) y el desplazamiento D (m):

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

$$M_w = (0,98 \pm 0,03)\log A_r + (4,07 \pm 0,06) \quad (5)$$

Karakais (1984) estimó, a partir del estudio de áreas submarinas desplazadas en el Mediterráneo, la siguiente relación para la longitud de la falla:

$$\log L = -2,22 + 0,57 M_s \quad (6)$$

Ésta proporciona un orden de magnitud de la longitud del área desplazada $L = 50$ km. Y, por consiguiente, un $W = 15$ km. Las figuras 5a y 5b ilustran las comparaciones entre lo registrado por los mareógrafos de Ibiza y Barcelona (línea azul) y lo simulado por el modelo (línea roja). De acuerdo con los resultados se puede concluir que el modelo representa de forma adecuada el fenómeno de generación y propagación de ondas de tsunamis, lo cual permite su aplicación de manera fiable en cualquier zona en donde se presenten este tipo de eventos.

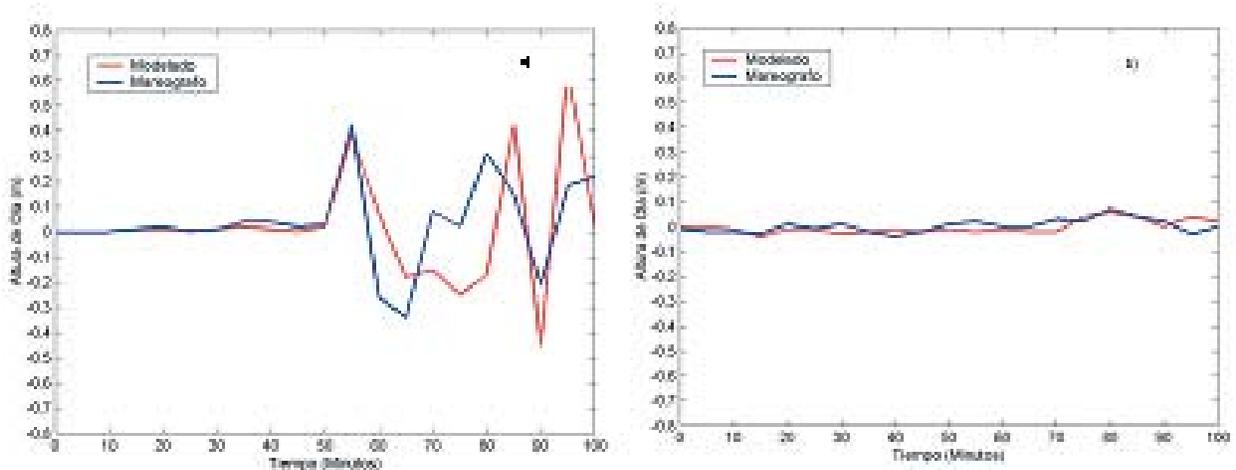


Figura 5. (a) Comparación del registro observado en Ibiza y el modelo COMCOT. (b) Comparación del registro observado en Barcelona y el modelo COMCOT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación del tsunami de 1979

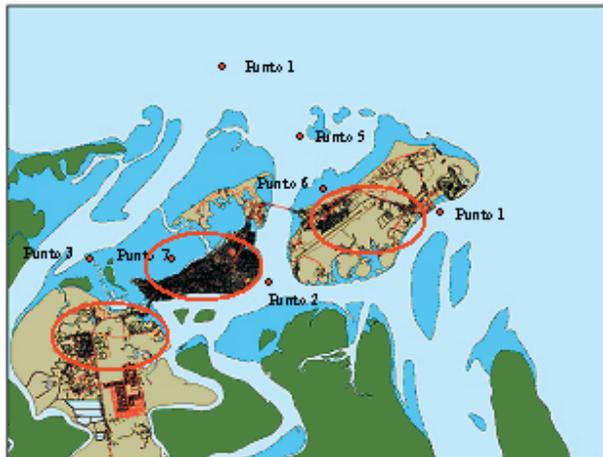
El epicentro generador del evento de 1979 estuvo localizado en la Zona IV (Figura 4b). La Figura 6a muestra las islas donde se ubica la ciudad de Tumaco, los puntos que fueron seleccionados para el registro temporal de la altura de ola simulada y su análisis comparativo. Para la simulación del evento de 1979 se utilizaron como mecanismos focales los calculados por Engdahl *et al.* (1998). La batimetría alrededor de las islas que conforman Tumaco corresponde a la existente antes del evento, la cual fue obtenida de las cartas náuticas históricas para la zona del trabajo de Smith y Sandwell (1997). A partir de esta información se consiguió la batimetría correspondiente a toda la cuenca del Pacífico colombo-ecuatoriano.

El nivel de marea para el instante del evento fue calculado a partir de las componentes armónicas halladas por Tejada (2002), el cual

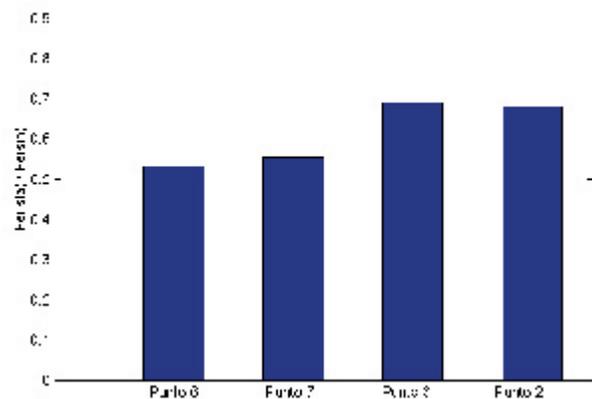
corresponde a 0.95 m. Las dimensiones del plano de ruptura fueron calculadas con las ecuaciones 4 y 5, las cuales coinciden con lo encontrado por Beck y Ruff (1984) para el proceso de ruptura del sismo de Tumaco de 1979 (sismo de $M_w = 7.9$; área de ruptura de $A_r = 12500 \text{ km}^2$, con $L = 180 \text{ Km.}$), y su dislocación ($D = 5.2 \text{ m}$).

Vale la pena mencionar que la batimetría incluye la isla barrera El Guano, la cual existía para la época. De igual forma, se simuló el mismo evento pero sin contemplar la isla El Guano, con el propósito de observar lo que ocurriría hoy en día sin esta isla barrera.

En la Figura 6b se presenta la relación entre el flujo de energía con isla y sin la isla El Guano, asociado a la ola de máxima altura. La Figura 7 ilustra la máxima inundación para ambos casos. En la gráfica se aprecia que El Guano genera una reducción del flujo de energía entre un 50 y 30 % para los sectores 6, 7, 3 y 2, que corresponden a las zonas con mayor concentración de habitantes.



(a)



(b)

Figura 6. (a) Localización de los puntos de registro (Tumaco) donde se obtiene la evolución temporal ola tsunami. Los círculos rojos indican las zonas más pobladas. (b) Reducción del flujo de energía de oleaje $Fe(isla)/Fe(sin)$ evento de 1979. $Fe(isla)$: Flujo de energía de oleaje con isla. $Fe(sin)$: Flujo de energía sin isla.

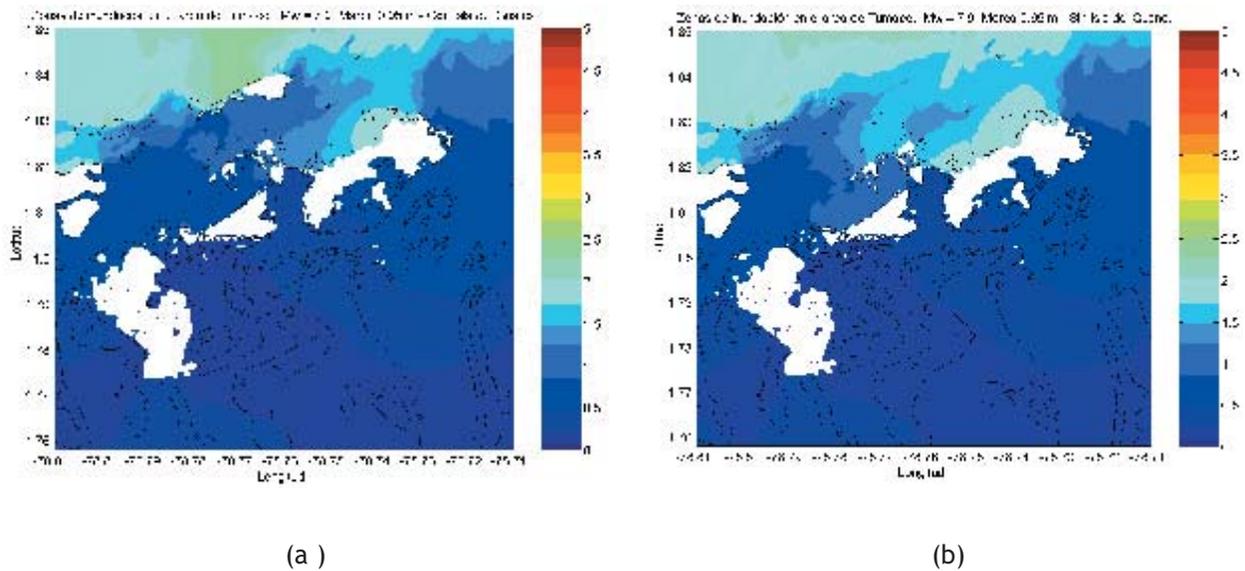


Figura 7. Máxima inundación para un sismo de $M_w = 7.9$, nivel de marea de 0.95 m. (a) Con isla El Guano y (b) Sin isla El Guano.

Tal como lo muestran los resultados de la simulación, la isla El Guano se desempeñó como un elemento disipador de la mayor parte de la energía de las ondas del tsunami. En la Figura 8 se presentan los resultados de la simulación para un nivel de

marea (cota = +3.6 m), apreciándose que la condición más crítica se presentó cuando la generación de un evento tsunamigénico coincide con la pleamar. Estos resultados confirman lo hallado por Quiceno y Ortiz (2001).

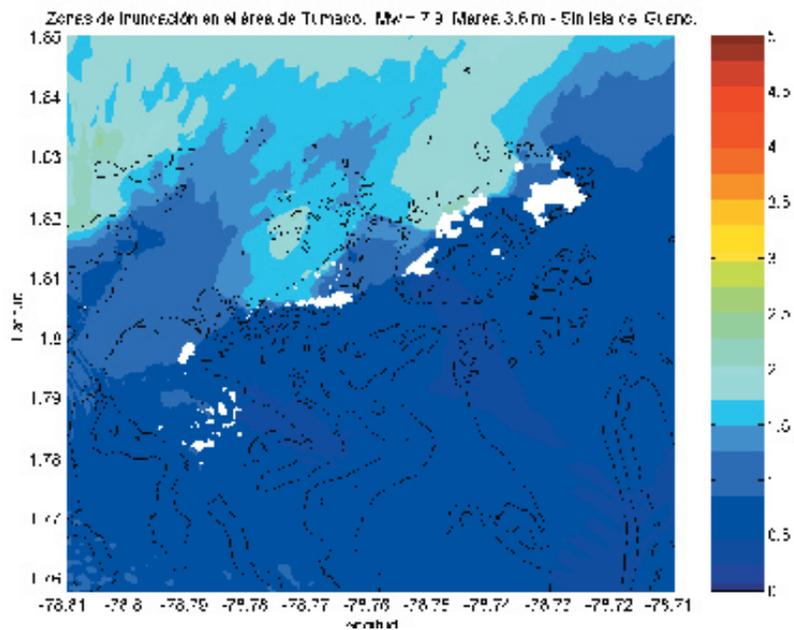


Figura 8. Máxima inundación para un sismo de $M_w = 7.9$, nivel de marea de 3.6 m.

Simulación numérica de eventos futuros

Para la simulación numérica de eventos futuros se seleccionaron las condiciones más desfavorables que pueden esperarse, es decir un evento con magnitud $M_w = 8.6$ al cual, según las ecuaciones 4 y 5, estaría asociado un área de ruptura ($A_r = 68000 \text{ km}^2$, con $L = 412 \text{ Km.}$) y dislocación vertical ($D = 10 \text{ m}$), con nivel del mar correspondiente al 5 % de excedencia (cota=+3.6) (Agudelo, 2003). Lo anterior con el propósito de evaluar, bajo condiciones extremas, la vulnerabilidad de la población asentada en Tumaco.

El origen y propagación de los casos correspondientes a las zonas de generación se realizaron tomando en cuenta los parámetros focales, mecanismos de generación y condiciones de cálculo anteriormente vistos. Las simulaciones contemplaron dos situaciones: sin isla barrera y con

isla barrera. Para todos los casos se contó con batimetría reciente de la bahía de Tumaco.

La Figura 9 presenta la relación entre las fuentes generadoras de tsunamis y los flujos de energía, con isla y sin isla, asociados a la celeridad y a la altura de la onda alcanzada en los puntos de comparación contiguos a las áreas habitadas (2, 3, 6 y 7. Ver localización Figura 6a). En la misma figura se aprecia que la isla barrera El Guano funcionó como elemento disipador del flujo de energía de las ondas de tsunami que alcanzaron a Tumaco. Es más eficiente para los tsunamis generados en las zonas I, II, IV y, principalmente, la III. No obstante y como se observa en la Figura 10a, los eventos generados en las zonas V y VI no fueron los que causaron el mayor impacto en las actuales circunstancias. La mayor cota de inundación ocurrió cuando el evento tsunamigénico se generó en las zonas I, II y IV.

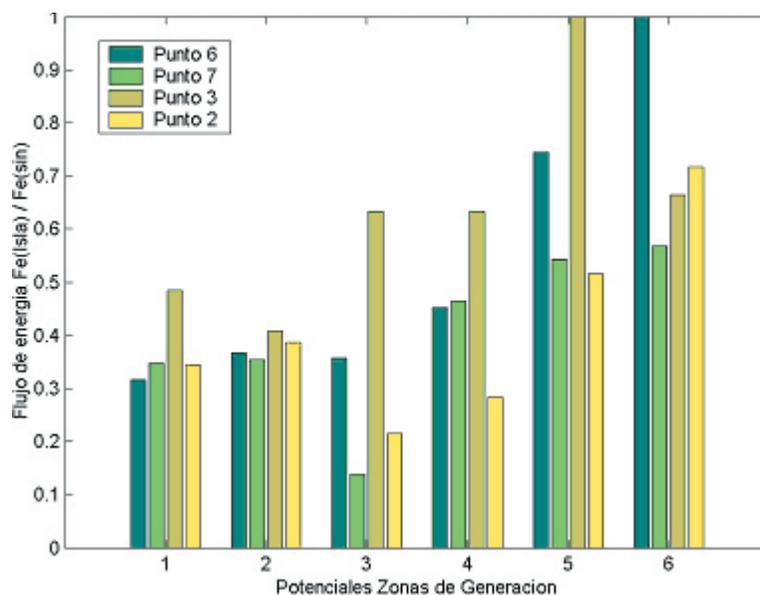


Figura 9. Relación entre los flujos de energía $Fe(\text{con isla})$ y $Fe(\text{sin isla})$ asociados a la primera ola de tsunami.

Siguiendo el análisis geotectónico, sísmológico y secuencia de liberación de energía (de sur a norte), se esperaría que el próximo evento se generara en una de las zonas II, III, V ó VI. La cota de inundación en la situación con isla barrera para todos los casos (Figura 10b) siguió por encima del nivel de pleamar y la cota de terrenos habitados. Aunque un evento generado en la Zona I sería el que mayores efectos destructivos podría causar, un evento generado

en las zonas II ó V parecería más probable de ocurrir, siguiendo la secuencia espacial de eventos. Un evento generado en la Zona II, en la situación actual, produciría una mayor inundación del área urbana de Tumaco que un evento generado en la Zona V; sin embargo, cuando los mismos eventos se evaluaron con la isla El Guano la disipación de energía de las ondas de tsunami fue mayor para eventos que tienen como fuente generadora la Zona II (Figura 9).

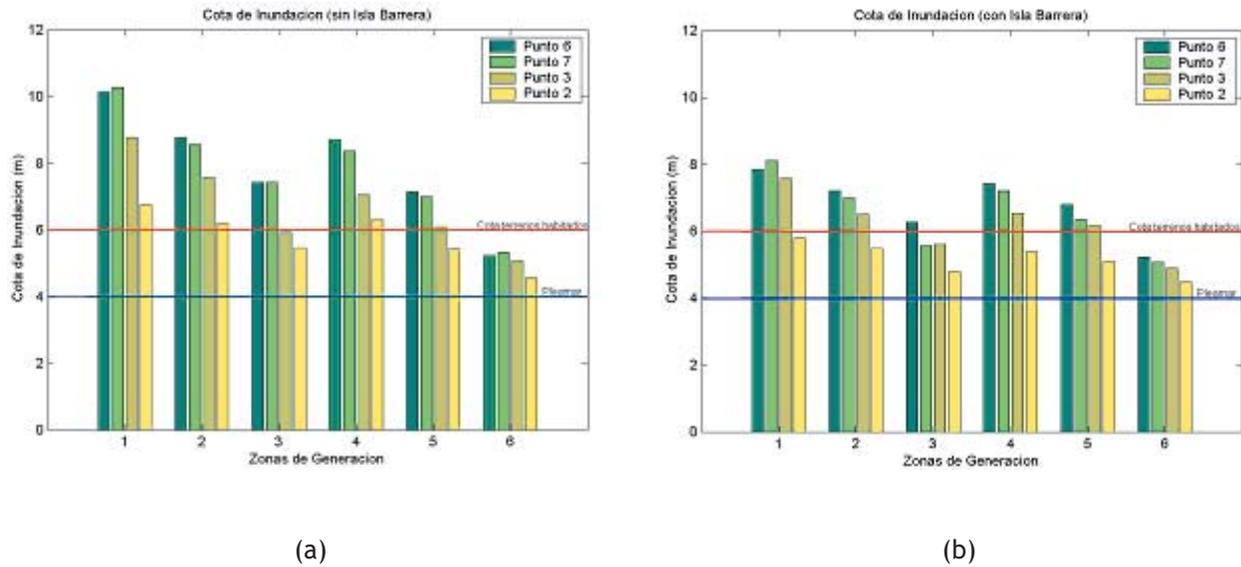


Figura 10. (a) Cota de inundación en la situación actual sin isla El Guano. (b) Cota de inundación en la situación actual con isla El Guano.

Efectos de la variación de la geometría de la isla El Guano

La isla El Guano permitió mitigar el efecto de los tsunamis en las islas de Tumaco, sin embargo, no fue suficiente dicha protección. Por ello se propusieron dos variaciones geométricas de la antigua isla El Guano, con el objetivo de

estimar su efecto como elemento disipador de tsunamis (Figura 11). Para la simulación numérica con ambas geometrías de isla barrera se seleccionó la Zona II como fuente generadora de tsunamis, bajo la condición más desfavorable; es decir, un sismo de magnitud $M_w = 8.6$ y el nivel del mar (cota +3.6 m).

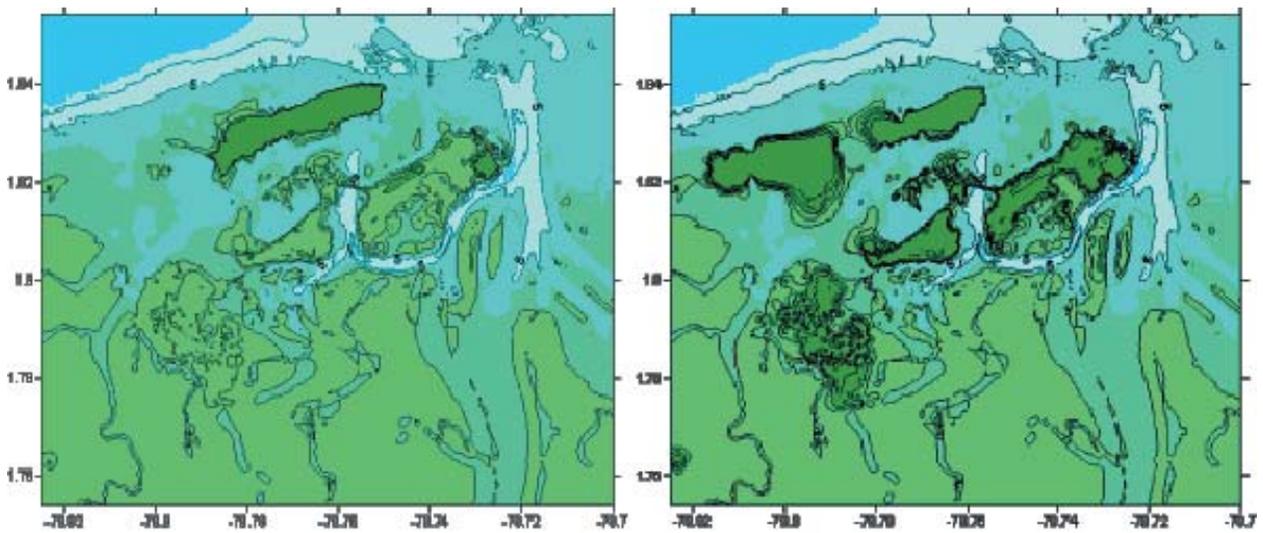


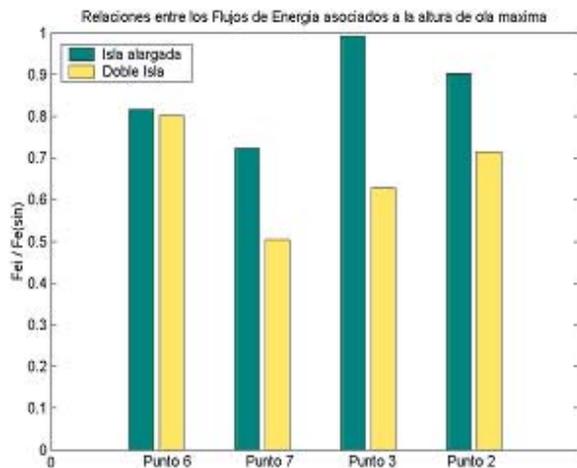
Figura 11. Isla barrera El Guano más alargada (izq.) y dividida en dos tramos (der.).

En la Figura 12a se presenta la relación entre los flujos de energía para cada geometría modificada de la isla (Fe_i) y el flujo de energía con la isla El Guano original (Fe_{1979}), asociados a la altura máxima de la ola alcanzada en los puntos de comparación contiguos a las áreas habitadas (2, 3, 6 y 7). En esta figura se demuestra que la mayor reducción del flujo de energía de las ondas de tsunami, con respecto a la geometría original de la isla El Guano, ocurrió cuando se colocó otra isla de similares características frente a la isla de Tumaco.

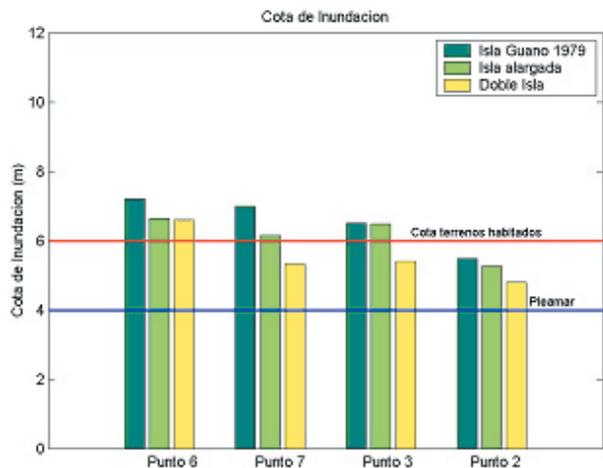
La reducción del flujo de energía alcanzado fue del 30, 40 y 50 % para los puntos 2, 3 y 7, respectivamente. Para el caso de doble

isla, la cota de inundación no superó los 5 m en los puntos 2, 3 y 7 (Figura 12b). El punto 6 siguió en la cota +6.0, debido a que necesita de una mayor protección en la zona norte de la isla El Guano.

De los resultados anteriores se tiene que, la forma alargada de la Isla del Guano y la colocación de otra isla barrera de similares características, reducen el flujo de energía de las ondas de tsunami. De las dos geometrías alternas a la original, la doble isla disipa una mayor cantidad de energía, sobre todo en los puntos 2, 3 y 7. Si se quiere reducir el efecto de tsunamis en el punto 6, tendría que ampliarse hacia el norte la isla barrera.



(a)



(b)

Figura 12. (a) Relación entre los flujos de energía Fe_i (diferentes geometrías) y Fe (isla El Guano 1979). (b) Cota de inundación en los puntos contiguos a las zonas más pobladas de Tumaco. Diferentes geometrías isla El Guano.

CONCLUSIONES

Al norte de la dorsal Carnegie, entre 0° y $4^\circ N$, se localiza la zona de mayor actividad sísmica histórica del litoral Pacífico colombo-ecuadoriano, donde se han generado los tsunamis de fuente cercana que han afectado la bahía de Tumaco. En esta zona se estableció una secuencia espacial de terremotos (SN) sobre dos franjas paralelas a lo largo de la zona de subducción, las cuales han permitido identificar seis potenciales zonas de generación de tsunamis de origen cercano. El tipo de mecanismo focal de las fuentes de generación de tsunamis en la zona son

fallas del tipo inverso, con rumbo NNE y epicentros ubicados en profundidades entre 20 y 40 km.

Un evento de características similares al de 1979 (nivel de marea 0.95 m) no representa daños considerables por tsunami para el área urbana de Tumaco; pues dadas las condiciones de marea, los niveles de agua no alcanzan a superar el límite máximo del nivel de pleamar. Caso contrario ocurre cuando el mismo evento sucede en pleamar (nivel del mar en la cota +3.6 m), por lo que el nivel de marea condiciona la propagación y posterior inundación del área costera. Inclusive, eventos no tan intensos

pueden provocar graves daños bajo una condición de pleamar.

Los resultados de la simulación del evento de 1979 mostraron que la isla barrera El Guano redujo el efecto del impacto de tsunamis, sobre todo en la isla El Morro, lo cual se corrobora con las evidencias testimoniales que existen del evento.

En las simulaciones bajo la situación actual, con la antigua isla barrera El Guano, en las condiciones extremas de un evento de tsunami ($M_w=8.6$, Nivel del mar = 3.6 m), existe una reducción importante en la altura de la lamina de agua. Sin embargo, resulta insuficiente para evitar la inundación de las áreas urbanas, debido a las características de costa baja donde se encuentra asentada la población de Tumaco. No obstante, se registran reducciones del flujo de energía hasta del 50 %, debido a la presencia de la isla, situación que mitiga el impacto del tsunami, por lo que se considera importante permitir su regeneración natural con ese propósito.

La isla El Guano, como tal, protege gran parte de Tumaco; sin embargo, debido a sus dimensiones y localización, existen zonas que quedan desprotegidas. Dentro del análisis de sensibilidad se determina que la isla El Guano debe extenderse hacia el sur y el norte, con el fin de brindar una mayor protección.

La determinación de la longitud, anchura de playa, cota de berma y número de islas en la zona del antiguo Guano debe ir acompañada de un estudio morfodinámico que garantice la estabilidad y funcionalidad de estas islas; como también de un estudio de impacto medioambiental, que permita determinar el efecto de la isla o islas a regenerar en las playas del área de estudio, en las especies biológicas, en la calidad del agua y las afecciones físico-químicas de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Marítima Colombiana (DIMAR) y a la Universidad de Cantabria por su apoyo para el desarrollo del presente trabajo.

De igual forma, el segundo autor agradece al programa Ramón y Cajal del Ministerio de Ciencia y Tecnología Español.

LITERATURA CITADA

Agudelo, P. 2003. Cota de inundación del litoral Pacífico colombiano. Tesina de máster. Universidad de Cantabria, España.

Beck, S. y L. Ruff. 1984. The rupture process of the great 1979 Colombia earthquake: evidence for the asperity model, *J. Geophys. Res.* 89, pp. 9281-9291.

Collot, J., P. Charvis, M. Gutsher y S. Operto. 2002. Exploring the Ecuador-Colombia Active Margin and Interplate Seismogenic Zone. *EOS, Transaction, American Geophys. Union*, Vol. 83, pp. 185-189.

Engdahl E., R. Van der Hilst y R. Buland, 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth relocation, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 88, pp. 722-743.

Engdahl, E. y A. Villaseñor. 2002. Global Seismicity: 1900-1999. *International Handbook of earthquake and engineering seismology*, Vol. 81A, pp. 1-26.

Gutsher, M., J. Malavieille, S. Lallemand y J. Collot. 1999. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters* 168, Elsevier, pp. 255-270.

Hall, M. y C. Wood. 1985. Volcano-tectonic segmentation of the North Andes, *Geology* 13, pp. 203-207.

Iida, K. 1963. Magnitude, energy and generation and mechanisms of tsunamis and a catalog of earthquakes associated with tsunamis. *Proc. of the 10th Pacific Science Congress Symposium. International Union of Geodesy and Geophysics U.G.G.I., Monograph* 24, pp. 7-18.

Iida, K. 1970. The generation of tsunamis and the focal mechanisms of earthquakes, *ADAMS, W.M, ed. tsunamis in the Pacific Ocean*, Honolulu, Hawaii, East-West Center Press, pp. 3-18.

Kanamori, H. y D. Anderson. 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology.

Bull. of the Seismological Society of America. Vo. 65 (5): 1073-1095.

Karakaisis, G. 1984. Contribution to the study of the seismic sequences in the aegean and surroundign areas. PhD. Thesis, Univ. of Thessaloniki, 192 pp.

Liu, P., Y. Cho, M. Briggs, U. Kanoglu, y C. Synolakis. 1995. Runup of solitary waves on a circular island. J. Fluid Mech., 302, pp. 259-285.

Mansinha, L. y E. Smyle. 1971. The displacement field of inclined faults, Bull. Seismol. Soc. Am. 61, pp. 1433-1440.

Mendoza, C. y J. Dewey. 1984. Seismicity associated with the great Colombia-Ecuador earthquakes of 1942, 1958, and 1979: Implications for barrier models of earthquake rupture. Bull. Seis. Soc.Am., Vol. 74 (2): 577-593.

Quiceno, A. y M. Ortiz, 2001. Evaluación del Impacto de Tsunamis en el Litoral Pacifico Colombiano. Parte 1 (Región de Tumaco). Boletín Científico CCCP (8): 5-14.

Smith, W. y D. Sandwell. 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, Science 277, pp. 1956-1962.

Swenson J. y S. Beck. 1996. Historical 1942 Ecuador and 1942 Peru subduction earthquakes, and earthquake cycles along Colombia-Ecuador and Peru subduction segments, Pure Appl. Geophys. 146, pp. 67-101.

Tejada, C. 2002. Clima marítimo de la bahía de Tumaco, un caso de aplicación del Sistema de Modelado Integral de Zonas Costeras para Colombia. Tesina de Máster. Universidad de Cantabria, (España).

Wells, D. y K. Coppersmith. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seism. Soc. Am., 84 (4): 974-1002.

Wiegel, R. 1970. Tsunamis. Earthquake engineering, Wiegel, R.L. (Ed), Englewood Cliffs, (NJ), Prentice-Hall, pp. 253-306.

