

MODELACIÓN DE TSUNAMIS EN LA COSTA PACÍFICA COLOMBIANA: Caso Bahía de Tumaco

Yuley Cardona¹, Mauricio Toro¹, Jaime I. Vélez¹ y Luis J. Otero²

1. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente - Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

**2. Grupo de Modelado Integral de Zonas Costeras. Centro Control Contaminación del Pacífico
fmtoro@unalmed.edu.co; ymcardon@unalmed.edu.co**

Recibido para evaluación: 16 de Junio de 2005 / Aceptación: 25 de Agosto de 2005 / Recibida versión final: 31 de Agosto de 2005.

RESUMEN

Los tsunamis son fenómenos naturales que se desarrollan en el océano y afectan las zonas costeras a través de diferentes manifestaciones como inundación, modificaciones geomorfológicas de la costa y del lecho marino. Las costas del Pacífico colombiano han sido afectado de manera significativa en cuatro oportunidades en el último siglo por este tipo de fenómeno. Ahora, una de las principales responsabilidades de los organismos de socorro y de quienes planean el territorio en esta porción del país es el conocer claramente la amenazas a la que están expuestas las comunidades. Mediante la modelación matemática de estos fenómenos, se pueden evaluar la inundación producida por un tsunami para diferentes eventos generadores. Adicionalmente, se pueden determinar aspectos que inciden en una correcta planificación del territorio como lo son la posición geográfica más desfavorable de las comunidades asentadas en la zona de influencia del tsunami y el tiempo de arribo de las ondas de tsunami. En este artículo se presenta la metodología y la aplicación de un modelo matemático para la simulación de ondas de tsunami con aplicación a la Bahía de Tumaco. Se presentan los criterios utilizados para la escogencia del sismo generador de tsunami, la escogencia de la marea relevante y los resultados de la simulación en mapas de inundación y de campo de velocidades de la onda de tsunami.

PALABRAS CLAVES: Tsunami, Modelación Matemática, Inundación, Sistemas de Alarma y Alerta Temprana.

ABSTRACT

Tsunami waves are natural phenomena that affect coastal zones and, in particular, during the last century the pacific coast of Colombia has been affected in a significant way by four tsunami waves. Now, one of the most important responsibilities of the institutions which take actions on the coast like the planning offices of the municipalities is to have very good knowledge of the hazard the communities on the coast are under the presence of such waves. By using mathematical models, these organizations are able to evaluate the effect of different tsunami events on the communities. Additionally, by using these tools and the results they provide, these institutions are able to plan properly the geographic distribution of the human settlements in order to guarantee them a minimum hazard for their lives. In this paper, we present a methodology to study the effect of a tsunami wave on a bay, particularly Tumaco Bay, by using a mathematical model. Several aspects of the methodology are presented like the criteria to choose the tsunami wave seism generator (intensity and location), and the relevant tidal wave acting during the transit of the tsunami wave. Results of the simulations for the Tumaco Bay, on the Colombian Pacific coast, are presented in form of inundation maps, and plots of level variations in time for strategic points of the bay.

KEY WORDS: Tsunami Waves, Mathematical Modeling, Flooding Maps, Alarm and Early Warning Systems.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las amenazas de origen natural a la que esta sujeta la costa del departamento de Nariño, es la ocurrencia de un tsunami generado por sismos de origen cercano. En el último siglo tuvieron lugar cuatro de estos eventos (1906, 1942, 1958 y 1979) los cuales afectaron a un gran número de pobladores de los municipios costeros (HTDB/PAC, 2001). Por otra parte, la costa Nariñense ha sido catalogada por el Instituto Colombiano Minero Ambiental (INGEOMINAS), como una zona de alta sismicidad, debido principalmente a su proximidad con la zona de subducción creada por el límite activo entre las placas de Nazca y Sudamérica. De esta forma, el sismo como elemento fundamental para la generación de ondas de tsunami en esta región del país, tiene asociada una alta probabilidad de ocurrencia, ya que las zonas de subducción son sistemas de alta y regular actividad.

La Undro (United Nations Disaster Relief Organization) y la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) durante la reunión “*Natural disasters and vulnerability*” en 1979, definió el término amenaza como: *la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un sitio dado. Es el resultado de la modelación probabilística de la amenaza y de la estimación del daño que puede sufrir un sistema, el cual se puede obtener también en forma analítica o basado en información empírica.* Además se considera que una amenaza solo existe si su manifestación afecta de manera desfavorable una población.

Los fenómenos naturales, entre ellos los tsunamis, de carácter avasallador y que presentan una amplia dificultad de predicción han sido tradicionalmente considerados como inevitables y con una alta incertidumbre acerca de su frecuencia y magnitud. Sin embargo el interés de geofísicos, sismólogos, meteorólogos y geólogos por el entendimiento de los fenómenos de la naturaleza ha favorecido la exploración de los mecanismos físicos que los generan y se han hecho grandes esfuerzos por asignarles una probabilidad de ocurrencia. Sin embargo en la mayoría de los casos, aún hoy en día, no ha sido posible predecirlos con certeza (Arellano, et. al. 2004).

Ahora bien, para el caso específico de la amenaza producida por las ondas de tsunami y éstas generadas

por sismos, es sobre este último sobre el que recaería la estimación de la probabilidad de ocurrencia donde entre otras variables se considerarían la magnitud, la profundidad y el mecanismo de falla que favorezcan la generación de las ondas de tsunami. Los métodos tradicionales de pronóstico de sismos están basados en el silencio sísmico premonitor en el futuro epicentro, la dilatación del terreno, la anomalía infrarroja térmica ($\sim 4^{\circ}\text{C}$), las anomalías magnéticas de extra baja frecuencia (10-20 veces sobre lo normal), la disminución de la resistividad del terreno, entre otros (Arellano, et al. 2004; USGS, 2005). Sin embargo la ventana de predicción de estos métodos no supera los dos meses, y por lo tanto son de gran ayuda solo si se acoplan a sistemas de alerta temprana y a una educación continua de la población expuesta. La asignación de probabilidad de la ocurrencia a largo plazo, en escala de años, bajo las cuales se planea el territorio, esta predicción es aún un problema sin resolver.

Por lo tanto, una alternativa para hacer la estimación de la amenaza por tsunami es la consideración de escenarios futuros, donde se seleccionan condiciones de borde y de generación de sismos que corresponden en algunos casos a la historia reciente, y donde éstos ya son intrínsecamente probables. También se consideran otros escenarios que basados en información de la sísmica presente podrían genera sismos de gran magnitud.

La inundación generada por la llegada a la costa de ondas de tsunami, produce pérdidas de vidas e inmuebles, modificaciones geomorfológicas de la costa y del fondo marino. En Colombia, la costa nariñense es precisamente la que ha soportado los mayores embates de este fenómeno natural, en la cual el evento más reciente ocurrió en diciembre de 1979 y estuvo asociado a un sismo de magnitud $M_w=7.9$ localizado sobre la zona de subducción (Soloviev, 1992) y el cual provocó el fallecimiento de 452 personas, 1011 resultaron heridas, 3081 edificaciones fueron reportadas como destruidas y 1066 como averiadas.

Se presenta en este trabajo el cálculo de la mancha de inundación en el casco urbano de Tumaco provocada por las ondas de tsunami. Tumaco es la segunda población más grande del Pacífico colombiano, después de Buenaventura, y la cual ha sufrido las mayores pérdidas durante el arribo de las ondas de tsunami a sus costas. En la Figura 1, se muestra la localización de la región de estudio, conjuntamente con las mallas de cálculo utilizadas por el modelo matemático.

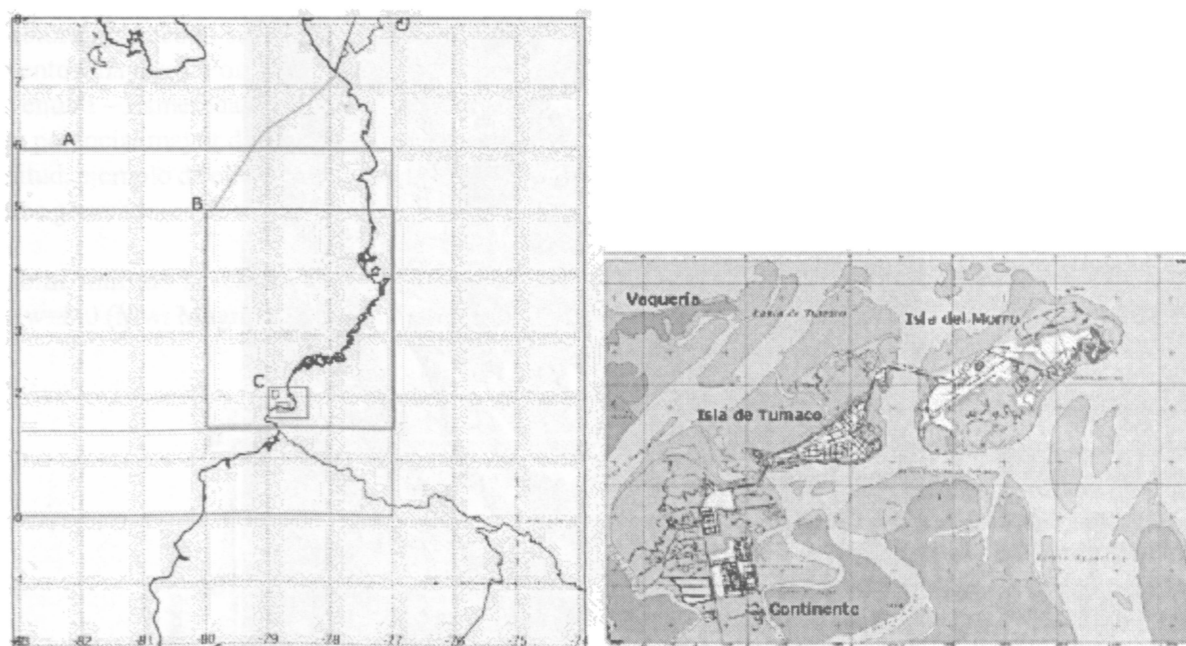


FIGURA 1. Ubicación de la zona de estudio, a la izquierda el Pacífico colombiano y la derecha el casco urbano de Tumaco (Mapa generado por la sección de Cartografía del CCCP).

La malla más interior corresponde al Casco urbano de Tumaco, conformado por las islas del Morro y Tumaco y un sector continental y sobre la cual se calcula la inundación.

El objetivo principal se centra en la identificación de la posición y magnitud del sismo que provoca la mayor inundación, además de la estimación del tiempo de arribo de las ondas de tsunami que se considera como el tiempo disponible por los pobladores para procesos de evacuación y resguardo. Para la simulación de la onda de tsunami se utilizó un modelo matemático desarrollado en el marco del Proyecto “Tsunami Inundation Modeling for Exchange” (TIME) de la UNESCO, que contó con la participación de la Universidad de Tohoku (Japón), la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (IOC) y el Grupo de Coordinación Internacional para el Sistema de Prevención de Tsunami en el Pacífico (ICG/ITSU).

2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el cálculo de la inundación se resume en el seguimiento de los siguientes cuatro pasos: a) Definición del sismo generador del tsunami, b) Definición de la deformación del lecho marino y de la superficie libre del mar, c) Tránsito de las ondas de Tsunami y d) Estimación de la magnitud de la inundación.

2.1 Definición del sismo generador

Para modelar las ondas de tsunami se requiere seleccionar las características del sismo generador, características que incluyen su localización, su magnitud y su mecanismo de falla, condiciones que determinan la dimensión del tren de ondas que arribará a la costa. La corteza oceánica cercana a la costa colombiana tiene una estructura geológica bastante compleja, estructura que incluye sistemas activos y extintos, entre los que resaltan la zona de subducción creada por la placa de Nazca y la de Sudamérica y la falla de Panamá.

La selección de las características propias de los sismos generadores de tsunami incluyó la revisión de recientes investigaciones sobre la evolución tectónica del Pacífico cercano a la costa colombiana, presentadas por Machede y Barckhausen en 2000, la exploración a la sismotectónica hecha por Gutscher et al, 1999, y la ubicación del epicentro con respecto a la entrada de la Bahía de Tumaco; los detalles están contenidos en Cardona, 2005. En la Figura 2 y Tabla 1 se relacionan los epicentros y mecanismos de falla seleccionados dentro de las modelaciones.

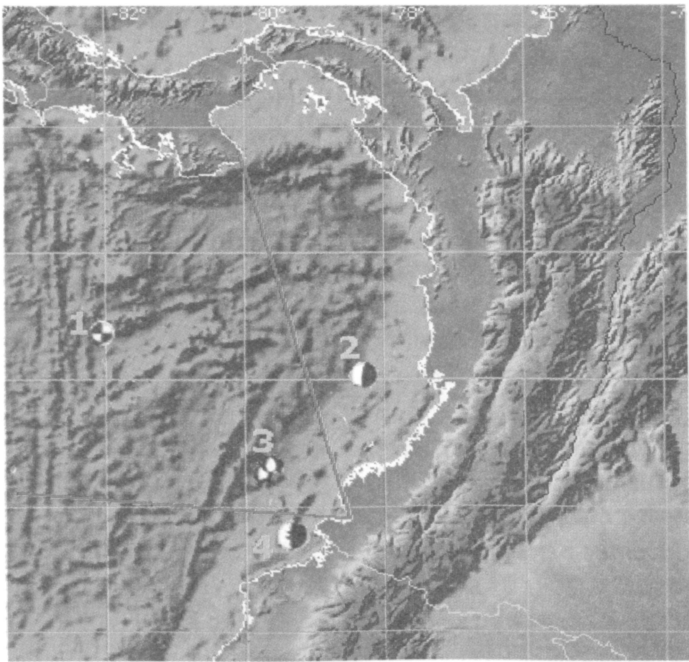


FIGURA 2. Eventos sísmicos seleccionados para la modelación; las líneas rojas dividen el Pacífico colombiano en tres zonas de acuerdo a su ubicación con la entrada de la Bahía de Tumaco.

TABLA 1. Elementos que describen los sismos seleccionados para la el cálculo de la inundación

Sismo- Evento	1	2	3	4
Epicentro	5.18° N, - 82.5° W	4.50° N, - 78,0° W	2.77° N, - 79.76° W	1.57° N, - 79.36° W
Profundidad del Hipocentro	18 Km.	25 Km.	30 Km.	26.6 Km.
Ángulos de la falla Strike/Dip/rake/	4° / 72° / -171°	13° / 13° / 95°	16° / 43° / -78°	30° / 16° / 118°
Tipo de Falla	Sinistral o de desgarre	superficial inversa	normal	cabalgamiento
Sistema tectónico asociado	Falla de Panamá	Zona de Subducción	Graben de Yaquina	zona de subducción

Los eventos 1 y 3 se localizan sobre la zona 2 de acuerdo a la división del Pacífico según su relación con la entrada de la Bahía de Tumaco; las ondas de tsunami generadas en estas posiciones no tienen obstáculos durante el tránsito hacia la Bahía, condición que si se presenta para los sismos 2 y 4 ubicados en las zonas 1 y 3 respectivamente, donde las ondas de tsunami chocan contra el borde costero antes de producir la inundación en el casco urbano de Tumaco. El evento 1 ubicado sobre la falla de Panamá tiene asociado un mecanismo de falla de tipo desgarre que no favorece la producción de ondas de tsunami, lo que finalmente se corroboró con las modelaciones.

Una vez definida la localización del sismo generador de tsunami, se procede a la selección de la magnitud asociada a tales sismos. En la Figura 3 se muestra la relación entre magnitud – profundidad necesaria para generar o no ondas de tsunami, donde se considera la Magnitud local (ML) y la profundidad del sismo, esta relación fue elaborada a partir de registros reales. Ingeominas, basado en evaluaciones de las características de los segmentos de subducción de la costa Pacífica colombiana, concluye que el segmento de Cabo Corrientes Norte – Buenaventura (aproximadamente la zona 1), se caracteriza por sismos de magnitudes alrededor de 7.0 como la ocurrida el 15 de noviembre de 2004 ya que las

zonas de rotura no pueden ser tan grandes como para generar eventos mayores. Por el contrario, el segmento de Buenaventura – Esmeraldas en el Ecuador (Zona 2 y 3), tiene un potencial mayor de generación de sismos de gran magnitud, ejemplo de ello son los sismos de 1906 y 1979, ambos generadores de ondas de tsunami.

Como umbral mínimo se eligió el valor $M_w=7.5$ y máximo $M_w=8.0$ (M_w : Magnitud de momento, medida

que representa con mayor precisión los sismos mayores). Para el evento 1 se inicia el cálculo por el umbral superior, ya que el mecanismo de rotura presente en la Falla de Panamá, no favorece la generación de ondas de tsunami. Los demás eventos serán evaluados inicialmente con estos límites y su cálculo con magnitudes intermedias obedecerá a los resultados obtenidos en ellos y a la réplica de eventos reales.

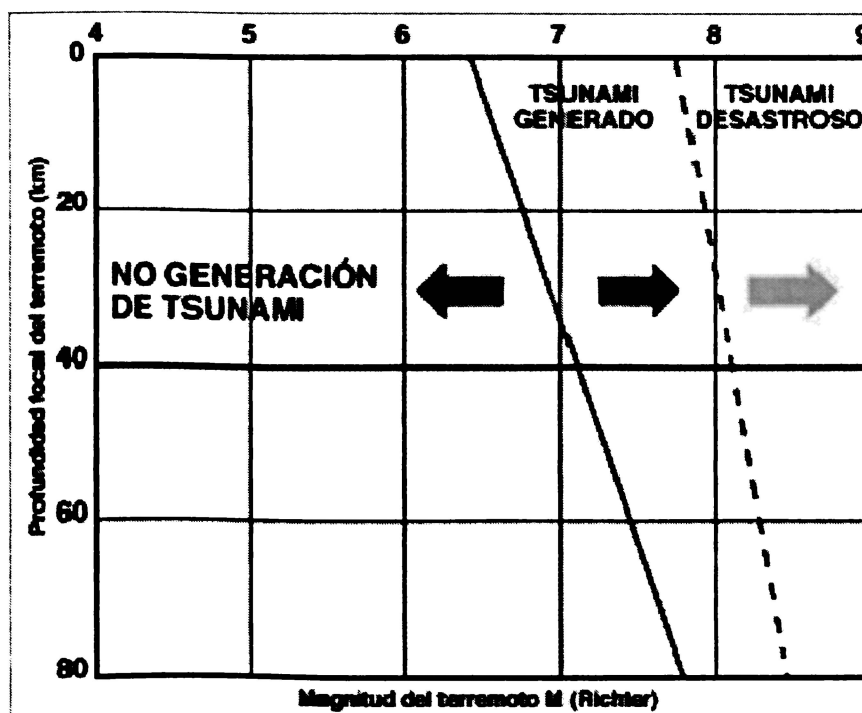


FIGURA 3. Relación magnitud del sismo – profundidad y el desarrollo de ondas de tsunami (Tomado de PUC, 2003)

2.2. Definición de la deformación del lecho marino y de la superficie libre del mar

Una vez definidos los parámetros que describen los sismos generadores, se procede con ellos al cálculo del desplazamiento vertical del fondo del mar. Este desplazamiento se calculó con el método propuesto por Mansinha y Smylie en 1971 (“The displacement fields of inclined faults”), desplazamiento éste, que se asume igual al perfil inicial del tsunami sin modificaciones por efectos hidráulicos, ya que su longitud es mucho mayor que la profundidad del agua cercana al epicentro. (Goto. et al, 1997). La aplicación de este método requiere, a parte de los elementos que describen el evento sísmico, de información batimétrica y topográfica en el dominio

de cálculo. Para estos requerimientos se utilizó la información batimétrica y topográfica de diversas fuentes y escalas, cada una acorde con las exigencias de las mallas de cálculo dentro del modelo que hace el tránsito de las ondas de tsunami.

La información batimétrica se obtuvo de las siguientes fuentes: a) del proyecto ETOPO2 (Smith y Sandwell, 1997), con una resolución de 2' de arco; b) de cartas náuticas levantadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, y de información batimétrica de detalle obtenida por el CCCP durante el año 2004; y c) de la información topográfica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y CCCP 2000.

2.3 Tránsito de las ondas de Tsunami

Hasta este punto se tiene seleccionado el elemento generador y los efectos que él causa al lecho marino, y por ende a la superficie libre del mar, todo esto en procura de calcular cómo las ondas generadas por la perturbación producida por el sismo transitan en el océano hasta llegar al borde costero, donde se manifiesta en forma de inundación.

El modelo numérico seleccionado para este cálculo fue desarrollado dentro del proyecto “Tsunami Inundation Modeling Exchange (TIME)” de la Comisión Internacional del Océano que hace parte de la UNESCO, el cual fue puesto a servicio de la comunidad en 1997.

El modelo numérico utiliza la teoría de aguas someras para ondas largas, donde la aceleración vertical de las partículas es despreciable comparada con la aceleración gravitacional; incluye la teoría no lineal, considerando la fricción que ofrece el fondo en la región de cálculo de la inundación. Las ecuaciones que utiliza el modelo son:

Conservación de masa:

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

Conservación de Momentum en direcciones W-E y S-N:

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

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

donde,

x e y : son las coordenadas horizontales, x en dirección W-E y y en dirección S-N.

η : es el desplazamiento vertical del agua sobre el nivel de referencia.

g : es la aceleración gravitacional,

D : es la profundidad total del agua que corresponde a la suma de $h + \eta$ (donde h es la profundidad desde el nivel de referencia hasta el fondo),

M y N : son las velocidades integradas en la vertical en direcciones x y y , respectivamente.

La fricción en el fondo se basa en la ley cuadrática de fricción y está controlada con el parámetro de rugosidad

de Manning (m). En este modelo no se contempla la viscosidad interna del fluido ni los efectos de la turbulencia (tensiones de Reynolds).

Este modelo matemático requiere de información batimétrica y topográfica en todo el dominio de cálculo y los campos de deformación del lecho generados por el sismo generador, como variables de entrada. Realiza los cálculos sobre mallas anidadas de diferente tamaño de celda, siendo la más exterior la que abarca el epicentro del sismo y la más interna sobre la que se calcula la inundación, casco urbano de Tumaco.

Una de las condiciones iniciales del modelo es el nivel de la marea, condición que permanece constante durante todo el periodo de cálculo. Para los eventos de tsunami de origen cercano, donde el tiempo de arribo de las ondas es inferior a una hora, esta aproximación es aceptable. En este caso, el nivel de la marea durante un evento de tsunami en el Pacífico colombiano es una variable que se considera determinante para la evaluación de la magnitud de la inundación provocada por el arribo de dichas las ondas ya que la amplitud de la onda de marea es del orden de varios metros. Se considera para las modelaciones de tsunami durante marea media un nivel de 2.2 m. que corresponde a una probabilidad de no excedencia del 49.5% y para marea alta 3.6 m. el cual tiene asociado 94.2% de probabilidad de no excedencia (Cardona, 2005).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los campos de inundación fueron calculados sobre la malla más interior (ver Figura 1) donde se encuentran las dos islas y el sector continental que conforman el Casco urbano de Tumaco. Se consideraron dos horas de modelación en las posiciones 2 (Zona de subducción Norte), 3 (Graben de Yaquina) y 4 (Subducción sur, posición donde se presentó el último sismo desencadenador de tsunami para el Pacífico colombiano) para el sismo generador y de tres horas en la posición 1 (Falla de panamá) del sismo generador. Las magnitudes de sismo seleccionadas varían entre M_w 7.5 y M_w de 8.0, siendo el sismo de magnitud $M_w = 7.5$ descrito como “Mayor” según USGS, y el sismo de magnitud $M_w = 8.0$ catalogado como “Grande” con amplia capacidad destructiva. Las magnitudes intermedias consideradas obedecen a la representación del último tsunami registrado en Colombia (Sismo con epicentro

en 4, $M_w = 7.9$) y a otras, producto del seguimiento de posiciones que representan mayor peligro para la zona estudiada.

La exploración sobre la afectación que cada uno de los sismos generadores provocaría a Tumaco, se inició con el cálculo para sismos con magnitud asociada $M_w = 8.0$. Los sismos con esta magnitud y con hipocentro superficial son potencialmente generadores de tsunamis desastrosos (Figura 3). Sin embargo, no solo la magnitud se debe considerar, sino también el mecanismo de falla, las condiciones de la plataforma oceánica, y la cercanía a la costa, entre otros.

Las simulaciones mostraron que el sismo con epicentro en la posición 1 localizado sobre la falla de Panamá y con $M_w = 8.0$ no genera ondas de tsunami a pesar de corresponder a un sismo de magnitud que potencialmente genera un tsunami desastroso. Este resultado se atribuye, principalmente, al mecanismo de falla presente en esta zona el cual es de tipo sinistral donde no existe elevación o hundimiento de las placas, si no un movimiento horizontal de bloques, que se conoce como un desgarro de las placas. También se obtuvo de las simulaciones que el sismo localizado en la posición 2 tampoco genera ondas de tsunami que provoquen inundación a Tumaco, solo una pequeña sobre elevación del nivel normal de marea.

Para las posiciones 3 y 4, los sismos con $M_w = 8.0$ producen ondas de tsunami que provocan una amplia inundación, por lo tanto sobre estas dos posiciones se centra la atención. Se presenta a continuación la evaluación de estas dos posiciones para $M_w = 7.5, 7.8, 7.9$ y 8.0 con estados de marea alta y media. El estado de la marea durante la inundación es una variable determinante, la ocurrencia en marea alta o media se ve reflejada en las zonas secas que se consideran de posible resguardo para los pobladores.

Para el sismo generador con epicentro en la posición tres, ubicada en la zona 2 a 128 Km. de la Bahía de Tumaco y con mecanismo de falla superficial normal, las ondas de tsunami son las de mayor magnitud y para un tiempo de arribo alrededor del minuto 40. En la Figura 4 se muestran en detalle, para esta posición del sismo generador, los campos de inundación para $M_w 7.5, 7.8$ y 8.0 en escalas homogéneas.

La inundación generada desde esta posición presenta ondas de hasta 4.75 m. de amplitud, lo que es completamente desastroso dado que la altura promedio sobre el nivel del mar de las islas y del sector continental es alrededor de 2 m. y por lo tanto la mayor parte de las islas estarían cubiertas con una lámina de agua de 2 m. de altura. El hecho de que para esta magnitud de sismo, la posición 3 sea la posición más desfavorable se debe principalmente a su ubicación frente a la bahía, donde las ondas de tsunami no tienen obstáculos desde el punto de generación hasta la entrada de la Bahía de Tumaco y la pérdida de energía es solo atribuible a la fricción con el lecho marino.

En todos los casos, las áreas no inundadas son mayores cuando el arribo de ondas de tsunami coincide con estado de la marea media, y éstas disminuyen cuando aumenta la magnitud del sismo generador. Los sitios que experimentan mayores altura de onda son Vaquería (islote localizado hacia la izquierda de la isla de Tumaco), La isla del Morro en las playas del Batallón fluvial de Infantería de Marina No 70 (BAFLIM-70) y la playa turística. La isla de Vaquería funciona como barrera natural para la isla de Tumaco ya que ella soporta el impacto inicial de las ondas de tsunami y en ella se disipa gran parte de la energía lo que se traduce en una reducción de hasta el 50% en las alturas máximas de ola incidente en la costa de la Isla de Tumaco. Su actual funcionalidad se asemeja a la atribuida a la isla del Guano durante la ocurrencia de los tsunamis de 1906 y 1979, en esta región.

El sector continental se ve afectado de manera importante. El agua hace su ingreso por los esteros presentes en el área, y solo parte de los terrenos de la Ciudadela no sufren inundación, dado que es un terreno sobreelevado artificialmente durante la ejecución del proyecto de reorientación de desarrollo urbano colombo – europeo ALA, que reubicó a los pobladores afectados durante el tsunami de 1979.

Para el sismo generador de magnitud de $M_w = 8.0$, durante marea alta y marea media, la inundación es de grandes proporciones y se considera destructiva, al igual que para una magnitud $M_w = 7.8$ durante marea alta; la única porción de terreno que no sufre inundación es el Morro (sitio ubicado a 75 m.s.n.m.). Las máximas alturas registradas en el dominio y el tiempo de arribo de la primera onda, que en todas las modelaciones corresponde a la de mayor tamaño del tren de ondas de tsunami, se

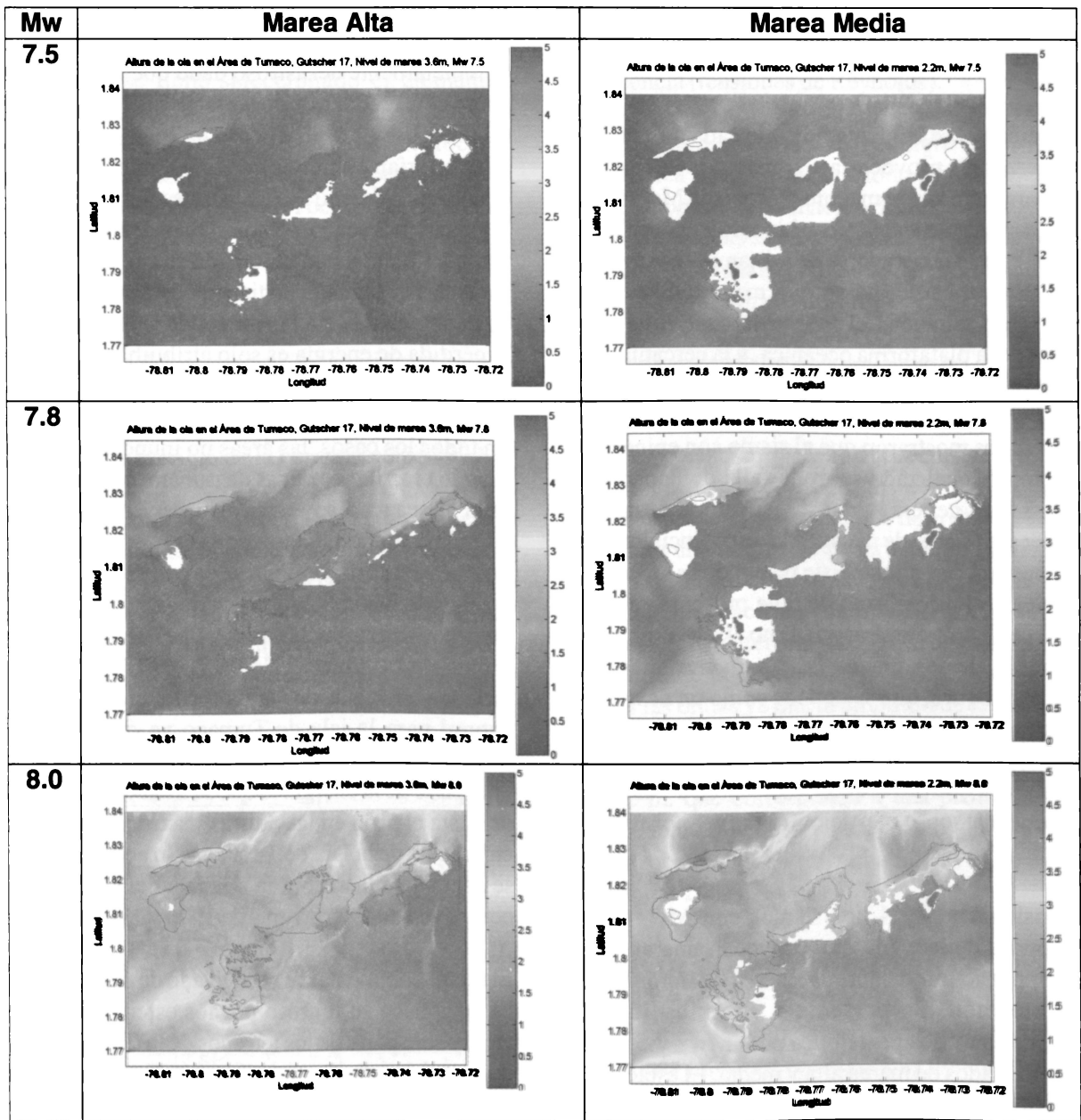


FIGURA 4. Distribución de la inundación máxima para la posición 3 durante marea alta y media con Mw de 7.5, 7.8 y 8.0

resumen en la Tabla 2. Sin embargo desde la magnitud más pequeña considerada ($Mw = 7.5$), la altura de la onda es de un tamaño destructivo para los pobladores de las islas durante su coincidencia con marea alta.

El sector más afectado, en todos los casos, por la extensión de la inundación, es el continental y por magnitud de la altura de la onda, son la Isla de Vaquería y la Isla de Morro, que soportan alturas máximas de

onda de hasta 4.5 m. en sus costas. El sector continental, aunque pareciera muy resguardado, la presencia de los esteros que lo rodean facilitan la circulación de la lámina de agua inundante.

TABLA 2. Resumen máxima altura de ola registrada y tiempo de arribo de la primera ola para la posición de sismo 3

Marea	Mw=7.5		Mw=7.8		Mw=8.0	
	H _{max} [m]	T _{arribo} [minutos]	H _{max} [m]	T _{arribo} [minutos]	H _{max} [m]	T _{arribo} [minutos]
Alta	2.03	35	3.11	40	4.75	40
Media	2.15	36	3.56	41	5.08	41

Otra localización relevante para la generación de eventos sísmicos desencadenadores de ondas de tsunami, es el sitio cuatro, donde se registró el último sismo que produjo tsunami en el Pacífico colombiano y que afectó la costa nariñense. El tiempo promedio de arribo de la primera onda de tsunami es de 20 minutos después de la ocurrencia del sismo. En la Figura 5 se muestran los campos distribuidos de inundación para Mw 7.5, 7.9 y 8.0 durante marea alta y marea media. Se corrobora de nuevo que el estado de la marea es una variable determinante de la extensión de la inundación.

Si se considera el tiempo de arribo de las olas de tsunami y éste como el disponible por los pobladores para una evacuación, esta posición provee la condición más desfavorable ya que solo se dispondría de 20 minutos para la evacuación, lo que para un municipio como Tumaco, con aproximadamente 80.000 habitantes en las

dos islas y el pequeño sector continental, es potencialmente desastroso.

Según la Figura 5, esta posición del sismo generador produce una inundación desastrosa por la basta zona afectada, para una magnitud del sismo de Mw = 8.0 y marea alta solo el Morro no sufre inundación, situación ésta similar a la obtenida en la posición 3 con Mw = 7.8 y marea alta. Cabe resaltar que para un sismo de Mw = 8.0, catalogado como Gran sismo, su ocurrencia desde este sitio y coincidiendo con marea media, ofrece amplias zonas no inundadas.

Por la dirección que toman las ondas de tsunami desde este punto de generación, la isla de Vaquería no tiene la misma eficiencia al actuar como isla barrera para la isla de Tumaco que la identificada para la posición 3, se presentan ahora alturas de onda similares en las costas de las dos islas, cercanas a 2.5 m.

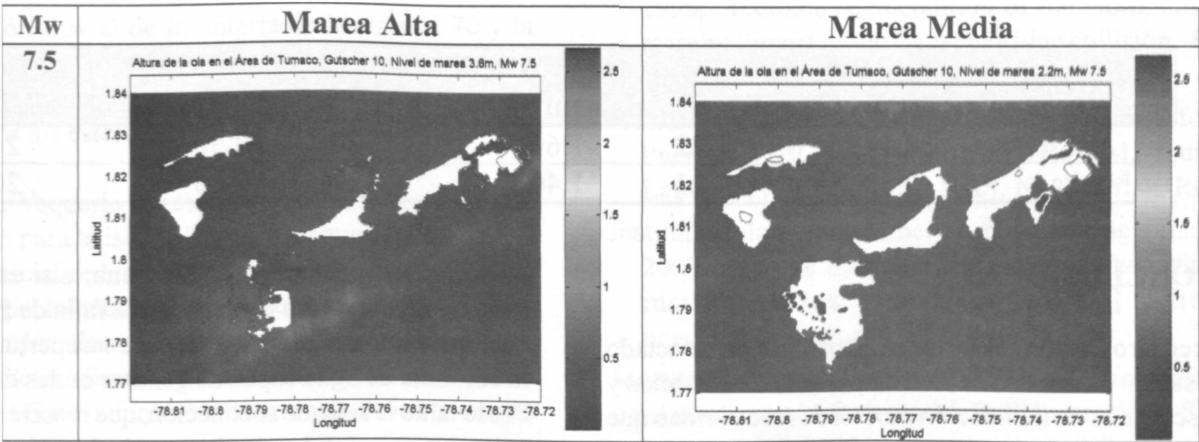
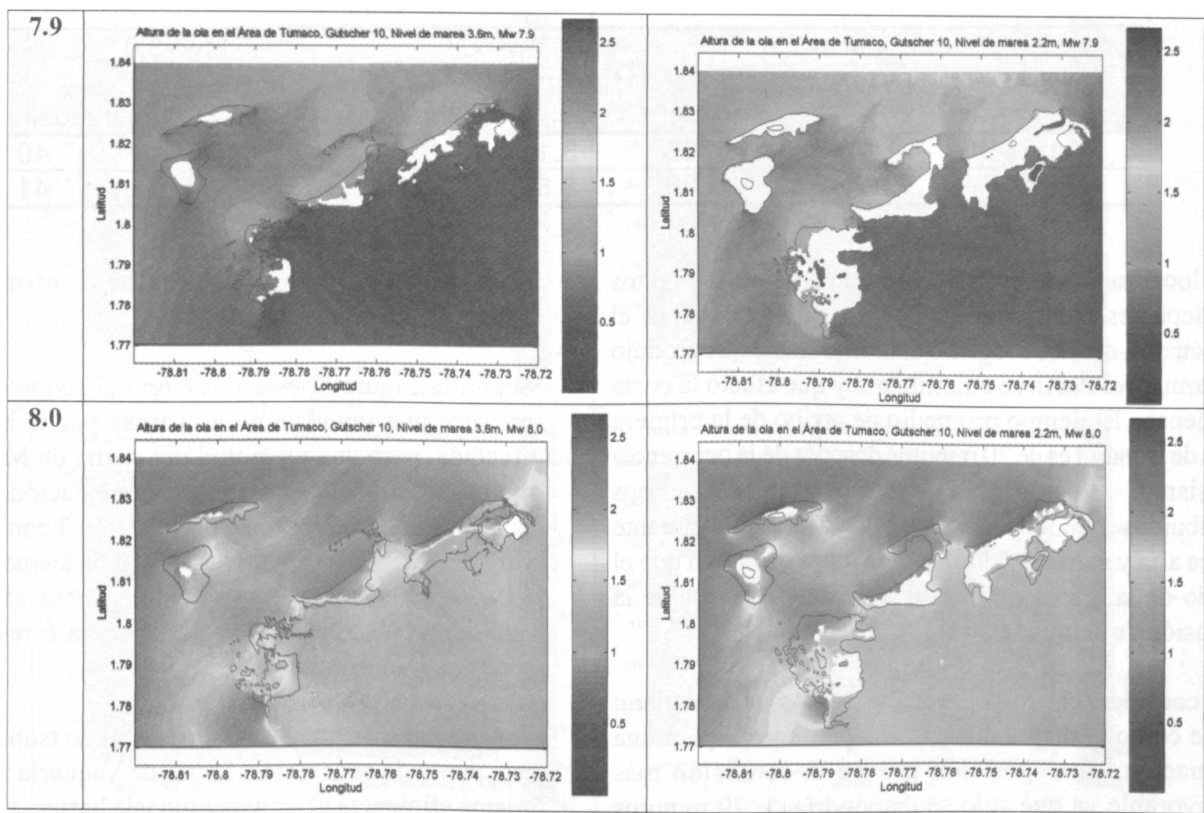


FIGURA 5. Inundación máxima en la malla D, para la posición 4 con Magnitud de sismo 7.5, 7.9 y 8.0 durante marea alta y marea media.



Continuación FIGURA 5. Inundación máxima en la malla D, para la posición 4 con Magnitud de sismo 7.5, 7.9 y 8.0 durante marea alta y marea media.

TABLA 3. Resumen máxima altura de ola registrada y tiempo de arribo de la primera ola para la posición de sismo 4.

Marea	Mw=7.5		Mw=7.9		Mw=8.0	
	H _{max} [m]	T _{arribo} [minuto]	H _{max} [m]	T _{arribo} [minuto]	H _{max} [m]	T _{arribo} [minuto]
Alta	0.64	22	1.60	20	2.50	20
Media	0.58	21	1.40	21	2.66	20

4. CONCLUSIONES

Los registros históricos de los tsunamis que han afectado la costa nariñense en tan sólo un periodo de 100 años y los escenarios de inundación modelados, confirman que la amenaza por tsunami de origen cercano en esta área del país es muy alta.

Los dos sistemas tectónicos de mayor actividad en el Pacífico colombiano y sobre los cuales se podrían generar sismos que desencadenen ondas de tsunami, son la Falla de Panamá y la zona de subducción creada por la placa

de Nazca y la placa sudamericana; sin embargo el mecanismo de rotura presente en la falla de Panamá, el cual es de tipo desgarre, no provoca una perturbación en la columna de agua capaz de generar ondas de tsunami. Por lo tanto la zona de subducción, que recorre el Pacífico colombiano paralelo a la costa, es la fuente principal de tsunamis de origen cercano.

La posición del sismo con respecto a la entrada de la bahía es determinante en la magnitud de la inundación. Las ondas de tsunami que recorren el Pacífico Colombiano cercano sin sobrepasar obstáculos que

reduzcan su energía desde el sitio de generación hasta la entrada de la bahía de Tumaco, generan las mayores altura de lámina de agua inundante, condición que se corrobora con los campos de inundación producidos por los sismos con epicentro en la zona 2.

Durante la inundación en el borde costero, las ondas de tsunami se superponen con la onda de marea, condición que modula la extensión y magnitud de la inundación. El régimen de marea en la bahía de Tumaco alcanza niveles máximos de hasta cuatro metros, razón por la cual la coincidencia de ondas de tsunami con niveles altos, medios o bajos de marea generan campos de inundación completamente diferentes, pasando desde los desastrosos hasta las leves inundaciones. En marea baja, la zona intermareal se convierte en un espacio de amortiguamiento de la inundación.

El tiempo promedio requerido por las ondas de tsunami, para el tránsito desde su origen hasta el casco urbano de Tumaco, está entre 20 y 35 minutos, condición que pone de manifiesto el poco tiempo disponible para los pobladores para realizar tareas de resguardo y para las autoridades locales y departamentales para la implementación de sistemas de alerta y de alarma, razón por la cual los planes de reacción deben ser simples, efectivos y precisos.

Los sitios que en todos los casos modelados experimentan mayor altura de ola son la isla de Vaquería, las playas del Batallón fluvial de Infantería de Marina N 70 y la playa turística. El sector continental se ve también afectado de manera importante en donde el agua hace su ingreso por los esteros presentes en el área.

La isla de Vaquería funciona como barrera natural de protección para la isla de Tumaco ya que ella soporta el impacto inicial de las olas de tsunami y disipa gran parte de la energía, lo que se traduce en una reducción de hasta el 50% en las alturas máximas de ola incidente en la costa. Su actual funcionalidad se asemeja a la atribuida a la isla del Guano durante la ocurrencia de los tsunamis de 1906 y 1979.

Los resultados aquí mostrados sugieren inmediatamente un estudio de evaluación de riesgos por inundación que considere no solo el nivel de inundación sino también el campo de velocidades presentes en las zonas afectadas. Este estudio se propone para realizarse en un futuro inmediato.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren hacer mención y reconocimiento del apoyo directo y la asesoría que el Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), adscrito a la Dirección General Marítima (DIMAR) a través del Grupo de Investigación Modelado Integral de Zonas Costeras, prestaron para la realización de este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Arellano, A., Zverev, A. y Malinnikov, V. 2004. Changes in geological faults associated with earthquakes detected by the lineament analysis of the aster (terra) satellite data. Moscow, Russia. [en línea http://www.geofisica.cl/papers/alonso2/Seismic_Risk.htm]
- Cardona, Y., 2005, Modelación de Tsunamis en la costa Pacífica colombiana. Caso de Aplicación Bahía de Tumaco. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín.
- Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. y Imamura, F. 1997. IUGG/IOC TIME Project: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guide No. 35, París, Francia, p. 38.
- Gutscher, M., Malavieille, J., Lallemand, S., y Collot, J. 1999. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Canegie Ridge collision. *Earth an planetary science letters* 168, pp.255-270.
- HTDB/PAC. 2001. Historical Tsunami Database for the Pacific, 47BC – 2000 AD. CD-ROOM, Tsunami Laboratory, ICMG SD RAS, Novosibirsk, Rusia.
- Instituto Colombiano Minero Ambiental (Ingeominas), 2003. Base de datos en línea eventos históricos e instrumentales. [En línea] <http://www.ingeminas.gov.co/>.
- Mansinha, L. y Smylie, D. E., 1971, The displacement of the earthquake fault model, *Bulll Seismol Soc Smeri.* 61, pp. 1433-1400
- Meschede, M., y Barckhausen, U., 2000, Plate tectonic evolution of the Cocos – Nazca spreading center. En Silver, E. A., Kimura, G. y Shipley, T. H. *Proc. ODP, Sci. Results*, 170 College Station, TX (Ocean Drilling Program), [en línea]. Disponible en www-odp.tamu.edu/publications/170_SR/volume/chapters/

SR170_07.PDF.

Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC). 2003. Curso Geografía del Mar.. [en-línea] URL: http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h71.html

Smith, W., y Sandwell, D., 1997. Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings, *Science*, 277, pp. 1956-1962

UNDRO (United Nations Disaster Relief Coordinator). 1979. Natural Disasters and Vulnerability Analysis in Report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979), UNDRO, Geneva.

USGS (United States Geological Survey). 2005. Real-time Forecast of Earthquake Hazard in the Next 24 Hours. Earthquakes hazards program. [en línea: <http://pasadena.wr.usgs.gov/step/>].