

Simulación Numérica de un Tsunami de Origen Lejano en su Aproximación a la Costa Pacífica Colombiana

JULIAN A. REYNA MORENO¹

RESUMEN

R los tsunamis (palabra de origen japonés, *tsu* puerto y *nami* ola), son ondas marinas de gran energía, capaces de destruir, sobre la ribera del mar, pueblos enteros (San Juan de la Costa, Colombia, 1979). Está comprobado que los tsunamis pueden causar desastres a muchos miles de kilómetros de su fuente -Chile, 1960-, fue hasta ahora un interrogante para la comunidad científica en Colombia, si la costa Pacífica colombiana, azotada en dos oportunidades por tsunamis de origen cercano, está también expuesta a la amenaza del tsunami de origen lejano. Este trabajo, calculó, mediante la solución numérica, las perturbaciones iniciales, verosímiles y específicas, generadas en la superficie del mar por terremotos ocurridos en el fondo oceánico, a la vez que estimó, para la costa Pacífica colombiana, la altura de la ola producida como consecuencia del mismo fenómeno. De esta manera, se ofrece una herramienta, que permite dar respuesta al

cuestionamiento fundamental de amenaza natural, aportando información de orden práctico, necesaria para el manejo del riesgo por un tsunami de origen lejano, en la costa Pacífica de Colombia.

ABSTRACT

Tsunami, originally from the Japanese word *tsu* harbor and *nami* wave, are great energy sea waves able to destroy complete towns over the coast, (i.e. San Juan de la costa, Colombia in 1979). It has been proved that tsunami can cause damage over thousands of kilometers from its source (Chile 1960). The scientific community in Colombia, wonders if the Colombian Pacific Coast, severely stroke by near field tsunami in two opportunities, is also exposed to far field tsunami threat. This work, calculated by means of a numerical solution, the initial believable and specific perturbations, generated at the sea surface as the result of an earthquake occurred at the bottom of the sea, so as the height of the wave that results from

the same phenomenon, close to the Colombian Pacific Coast. In this manner, it is given a tool to answer a fundamental question of natural threat, giving practical information, necessary for the management of the far field tsunami risk, in the Colombian Pacific Coast.

INTRODUCCIÓN

Con base en la información histórica que se posee, se cuestiona la posibilidad de que un tsunami generado fuera de la zona de subducción Colombo-Ecuatoriana, pueda alcanzar la costa Pacífica colombiana con la energía suficiente para impactar la ribera (Meyer, 1994).

El tsunami es una alteración del medio marino, comúnmente producida por fenómenos naturales (sismos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra o meteoritos), que al producirse en el mar, liberan gran cantidad de energía que es transferida a la superficie oceánica, generando ondas gravitatorias capaces de

¹ Capitán de Corbeta, Oceanógrafo Físico, Centro Control de Contaminación del Pacífico, E-mail: dfof@sirius.enap.edu.co

desplazarse a velocidades cercanas a la del sonido, recorrer distancias transoceánicas y alcanzar amplitudes de decenas de metros, a medida que se acercan a la costa; motivos por los cuales suelen causar daños catastróficos con su arribo a lugares poblados.

Sus principales acciones, son producidas por: El impacto de la ola, las velocidades de las corrientes de inundación de la misma y la erosión de los terrenos en las costas o en los cauces bajos de los ríos (Meyer y Velásquez, 1992). El presente estudio, analizó los casos producto de sismos submarinos, por ser una fuente de mayor probabilidad de ocurrencia y sus efectos finales son similares a los de las otras fuentes.

La Cuenca del Océano Pacífico, se encuentra rodeada de fuentes sísmicas (zonas de subducción), conocidas en su conjunto con el nombre de "Cinturón de Fuego del Pacífico". Estas fuentes, en algunas oportunidades, son también generadoras de tsunami transpacíficos, como por ejemplo el de Chile de 1960, el cual impactó a Japón, causando pérdidas humanas y materiales.

La altura del tsunami en su llegada a la costa es determinada simultáneamente por varios factores: El tamaño (magnitud) del terremoto, la distancia recorrida, la batimetría y la forma de la costa. Para el fenómeno específico que analiza este trabajo, la altura de la ola a distancia, depende

principalmente del relieve submarino (Robert y Chien, 1967 y Okal, 1987).

El análisis preliminar de esta investigación tiene como base los reportes realizados sobre datos históricos de fenómenos que originaron tsunami en lugares lejanos, como Chile 1960 y 1982, Alaska 1964, Islas Kuriles 1994 y que no llegaron de manera contundente al Litoral Pacífico colombiano (Meyer, 1994).

JUSTIFICACIÓN

El estudio encontró claras justificaciones en hechos sociales, económicos, técnicos y operativos, como se explica a continuación:

Debido a que los datos históricos son muy vagos para llevar a cabo la investigación estadística, se decidió, por primera vez en Colombia, realizar el estudio de este fenómeno, mediante el empleo de las técnicas más avanzadas a nivel mundial para el pronóstico de la altura de la ola, la simulación numérica de los procesos de generación y de propagación, que en este caso, fueron simulados desde el lugar de la fuente hasta la proyección en la superficie oceánica, de la isóbata de los 150 metros, en la costa Pacífica colombiana.

El conocimiento verificado de si este tipo de ondas pueden causar desastres en el Pacífico colombiano, es de gran relevancia socio-económica para la región, debido

a que por carecer de vías artificiales de comunicación, tiene ubicados a la mayoría de sus asentamientos humanos sobre la costa. El estudio es de especial interés para la Armada Nacional porque al ser su naturaleza de carácter marítimo, sus operaciones y bases navales se encuentran estrechamente ligadas al margen continental. Por otra parte, debido a la carencia previa de conocimiento, se han ejecutado a nivel regional, falsas alarmas de tsunami lejano, que como resultado ha dejado grandes pérdidas económicas innecesarias. Estos errores se han producido, específicamente, a causa de que los sistemas de alerta del PTWC (Pacific Tsunami Warning Center) que aún no se encuentran perfeccionados (Mena, 1996).

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El fundamento matemático, se basó en la aplicación de la teoría de aguas someras, la cual trata a las ondas cuya longitud (L), es muy superior a la profundidad (h) del medio en donde se desplazan.

$$\frac{h}{L} \ll 1$$

Las rutinas de modelación "TUNAMI" (Tohoku University Numerical Analysis Modeling for Investigation), están diseñadas para aplicar esta teoría, modelando numéricamente la onda larga superficial de un fenómeno físico marino. Se asume que las características de la onda

transoceánica se conservan por no entrar en interacción con el fondo, igualmente, se asumen ondas largas de periodos establecidos entre 50 y 70 minutos (Kuroiwa, 1995).

TEORÍA DE AGUAS SOMERAS

La teoría de ondas largas, es una aproximación aplicable a ondas que se desplazan en profundidades relativamente pequeñas (hace referencia a la tasa de variación de la profundidad del agua con respecto a la longitud de onda), para la cual la aceleración vertical de las partículas de agua es muy pequeña comparada con la aceleración gravitacional y la curvatura de la trayectoria de las partículas de agua es significativamente pequeña.

Consecuentemente, el movimiento vertical de las partículas de agua no tiene efecto en la distribución de presión, por lo tanto es una buena aproximación, decir que la presión es hidrostática. Adicionalmente, la velocidad horizontal de las partículas de agua es verticalmente uniforme.

Basado en estas aproximaciones, el movimiento de ondas largas está expresado por la siguiente teoría de aguas someras.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [u(h+\eta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(h+\eta)]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (3)$$

En donde x y y son coordenadas horizontales, t tiempo, h la profundidad del agua en reposo, η el desplazamiento vertical de la superficie del agua sobre el nivel del agua en reposo, u y v las velocidades de las partículas de agua en las direcciones x y y , g la aceleración gravitacional, τ_x/ρ y τ_y/ρ las fricciones del fondo en las direcciones x y y .

La fricción del fondo se expresa de la siguiente manera, en una analogía del flujo uniforme.

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{1}{2gD} f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{1}{2gD} f v \sqrt{u^2 + v^2}$$

donde D es la profundidad total sumando $h + \eta$ y f es el Coeficiente de Fricción. En el documento original, en donde se formula el modelo, los autores (Goto y Ogawa, 1982), emplean el Coeficiente de Rugosidad de Manning n , a cambio de f . Estos dos coeficientes se relacionan por:

$$n = \sqrt{\frac{fD^{1/3}}{2g}}$$

Quedando entonces las fricciones de fondo expresadas por:

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{n^2}{D^{4/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{n^2}{D^{4/3}} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

A continuación se relacionan los flujos integrales (M y N) con u y v , es decir, en las direcciones x y

$$M = u (h + \eta) = uD, \quad N = v (h + \eta) = vD$$

Se presentan las ecuaciones:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{1/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{1/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (8)$$

Estas son las ecuaciones fundamentales empleadas en la modelación. Se recomienda el empleo de las ecuaciones (6), (7) y (8), y no las tres primeras, puesto que al ser discretizadas las ecuaciones formales, en algunas oportunidades, no satisfacen adecuadamente la conservación de masa, convirtiéndose en fuente de grandes errores. Adicionalmente el último grupo de ecuaciones satisface también la conservación de momento en forma discretizada.

CONDICIONES INICIALES

El programa está diseñado únicamente para cálculo de tsunami, no se incluyen olas de viento ni ondas de marea y como condición inicial se asumió que:

$$\text{para } t = 0 \Rightarrow M = N = 0 \quad \eta = 0$$



CONDICIONES DE FRONTERA

Se asume una frontera abierta, lejana de la costa, para un tren progresivo de ondas sinusoidales.

El movimiento real del agua en una frontera alejada de la costa, no está dado por la onda seno, sino por los resultantes de los avances y retrocesos de la onda seno.

Si el movimiento del seno está dado en una frontera, no puede pasar ninguna onda reflejada a través de la frontera y se introduce inevitablemente una oscilación forzada. En una frontera abierta es necesario permitir el paso libre de la onda reflejada, para que salga de la región de cómputo (Goto y Ogawa, 1982).

La condición de frontera en tierra es la reflexión perfecta. El componente de velocidad o componente de flujo de descarga normal a la frontera de tierra es hecho cero.

En una frontera abierta, la condición de frontera es la libre transmisión. En Términos de u , la condición lineal de libre transmisión es:

$$\eta = +\sqrt{\frac{h}{g}} \cdot u \text{ para ondas avanzando}$$

$$\eta = -\sqrt{\frac{h}{g}} \cdot u \text{ para ondas retrocediendo}$$

En donde η es el nivel del agua y u es la velocidad. En términos de la descarga de agua Q , la condición está dada como sigue,

asumiendo que $\eta \ll h$.

$$\eta = +Q/\sqrt{gh} \cdot u \text{ para ondas avanzando}$$

$$\eta = -Q/\sqrt{gh} \cdot u \text{ para ondas retrocediendo}$$

Aquí se requieren dos criterios. Uno es la evaluación del flujo de descarga Q y el otro es la dirección de la propagación de la onda, así, definimos el flujo de descarga resultante como:

$$Q = \sqrt{\frac{(M_1 + M_2)^3}{4} + N_2^2}$$

La dirección de propagación de onda puede definirse por el signo de N_2 en relación con la alineación de la frontera en mar abierto (Imamura y Shuto, 1992)

SELECCIÓN DE ÁREAS DE MODELACIÓN

Al analizar diversos casos de tsunami transpacíficos, se concluyó que para conocer el comportamiento de las ondas de tsunami provenientes de cualquier punto del Cinturón de Fuego hacia Colombia, no era necesario modelar cada posible origen, aunque se acepta que es el modelo ideal, pero se debe contar con que los recursos económicos, de tiempo y de cómputo son limitados. Por lo tanto, con base estadística en la magnitud de los eventos históricos y en la recurrencia sísmica, sumado a que el desplazamiento de la onda ofreciera total cubrimiento del Océano Pacífico se definieron tres zonas

frente, una Norte, en Norte América; una Centro, en el Pacífico Occidental Ecuatorial y una Sur en Sur América.

SELECCIÓN DE LA FUENTE ORIGEN DE TSUNAMI

Para la afinación del trabajo estadístico de selección de la fuente se emplearon los criterios de: magnitud del sismo tsunamigénico, periodo de recurrencia sísmica y localización geográfica de la fuente. En forma complementaria, se verificó la caracterización de zonas fuente de tsunami realizadas por Okal (1987).

El parámetro del foco sísmico que se relaciona más estrechamente con su potencial tsunamigénico es el momento sísmico M_0 (Kanamori, 1972), que cuantifica la energía sísmica liberada, concepto análogo al del momento en la mecánica de cuerpos rígidos y representable en función de la rigidez de la roca (módulo de rigidez μ), del área de ruptura (longitud de la falla L y ancho de la falla W) y del desplazamiento (Magnitud de dislocación d).

$$M_0 = \mu W L d$$

Para la obtención de datos estadísticos se empleó la información de las bases de datos que reposan en el Observatorio Sismológico de Sur Occidente (OSSO) en la Universidad del Valle, como los Catálogos de

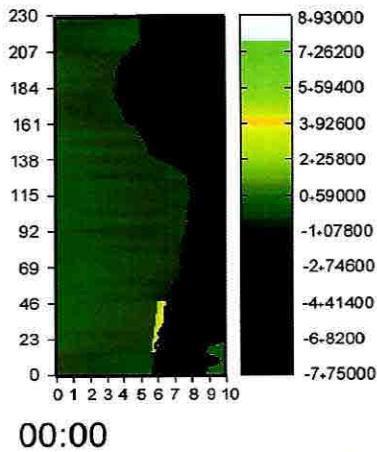


Fig. 1 Modelo de Tsunami de Chile de 1960. Escala vertical, en metros a la derecha de la figura y en la esquina inferior izquierda se observa el tiempo de viaje de la onda en horas y minutos. En amarillo la zona de deslocalción

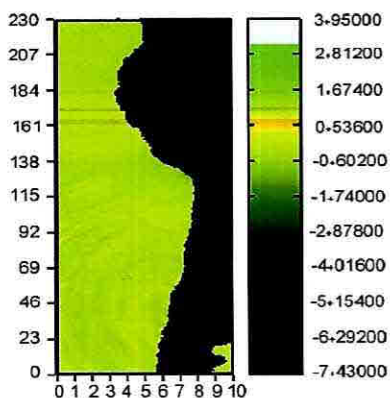


Fig. 2 A las tres horas la primer onda significativa llega a Colombia.

Tsunami de Soloviev y Go (1984), el Global Hypocenter Data Base (USGC/NEIC, 1994) y la base de datos del estudio de Okal (1992). De la misma forma se revisaron catálogos de otros centros de investigación como los de la Universidad de Washington.

Finalmente, se estableció que se emplearían los datos de los sismos

de: Chile en 1960 para la Zona Sur, de Alaska en 1964 para la Zona Norte y de Islas Marianas en 1990 para la Zona Centro.

SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y RESOLUCIÓN DE LA GRILLA

Al emplear la rutina TUNAMI-F1, no fue necesario contemplar el anidamiento entre grillas e incluir el área de inundación.

La rutina está diseñada para calcular tsunami transoceánicos ocasionados por terremotos submarinos, sin emplear grillas de diferente resolución, puesto que no contempla la modelación de la fase terminal.

La resolución de la grilla, se obtuvo con base en el Número de Courant (Cr), el cual describe el tamaño del paso del tiempo relativo a la discretización espacial, mediante el cual la estabilidad de la solución depende de Cr y no de Δt únicamente, como en una ecuación diferencial ordinaria.

$$Cr = \Delta x / c \Delta t$$

donde, c = velocidad de la onda larga.

El número de Courant ha sido sugerido por Mader (1988) y empleado por Imamura y Shuto (1992). La resolución se estableció en 15 minutos de arco y el tamaño de la grilla varió de acuerdo con cada modelo, cuidando siempre de dejar incluidos

los accidentes geográficos que pudieran interferir con el avance de la onda. La matriz de batimetría relacionada con la grilla se obtuvo sobre la base de datos alimétrica y batimétrica mundial del National Geodetic Data Center (NGDC), ETOPO- 5.

RESULTADOS

Chile 1960: El tsunami generado en Chile, mantiene en su recorrido energía suficiente para llegar a la costa colombiana del Pacífico, sin embargo, se interpone a su paso la franja del continente suramericano ubicada entre Arica ($73^{\circ}W$, $19^{\circ}S$), al norte de Chile y Punta Pariñas ($82^{\circ}W$, $17^{\circ}S$), al extremo occidental de Perú, que direcciona las ondas hacia el Pacífico asiático. De la misma forma, se observó cómo la Dorsal del Pacífico Oriental, enfoca la energía hacia el Pacífico Noroccidental. Por estas razones, la disipación de energía no permite que el Pacífico colombiano se vea seriamente amenazado por un tsunami, generado en Chile, (Figuras de la 1 a la 4).

Alaska 1964: En este experimento, sucede algo similar a lo ocurrido con el tsunami de Chile en 1960, la interferencia es causada por la costa Oeste de Norte América, desde Alaska hasta el sur de California. Se conforma así una zona de sombra triangular (la energía de la onda es mínima), donde los catetos del triángulo corresponden a la costa

Sur de Centro América, la costa del Pacífico colombiano y la línea imaginaria entre el sur de Ecuador y el sur de California.

Es de especial interés observar que debido a la reflexión de la onda en las Islas Galápagos, la altura de la ola que llega a las costas colombianas, es mayor en el Norte del Pacífico que en el Sur, sin embargo, se concluye que tampoco este tsunami es considerado una amenaza severa para Colombia, debido a la escasa altura de la ola terminal. (Figuras de la 5 a la 12)

Islas Marianas 1990 (modificado): Inicialmente se modeló el tsunami de las Islas Marianas de 1990, pero su energía no fue suficiente para alcanzar el Pacífico Oriental, es decir su magnitud en la escala de Richter fue $M=7.2$, por lo tanto, se revisaron los catálogos de tsunami en busca de información que permitiera comprobar la posibilidad de ocurrencia de un sismo de mayor magnitud con el mismo origen.

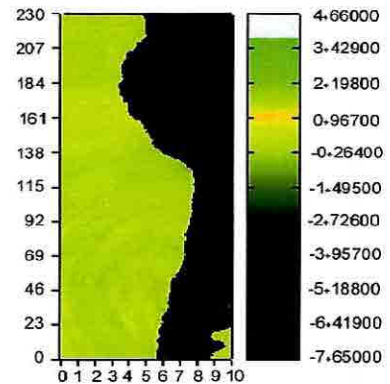
Una vez comprobado, se procedió a modelar nuevamente el tsunami de 1990 con mayor magnitud ($M=8.2$), lo que dio origen al modelo llamado Islas Marianas 1990 (modificado).

En la simulación se observa que la disipación de energía de la onda a través del Pacífico es mínima, produciendo como resultado una amenaza que se considera severa para el Pacífico colombiano (Ver

La tabla 1, presenta el cálculo de altura de la ola, en metros, sobre el beril de los 150 metros, para tres puntos estratégicos ubicados en el Pacífico colombiano. La tabla 2 muestra el tiempo de arribo en horas y minutos, la altura máxima de la ola en metros y el tipo de amenaza que permite pronosticar el cálculo de cada uno de los modelos.

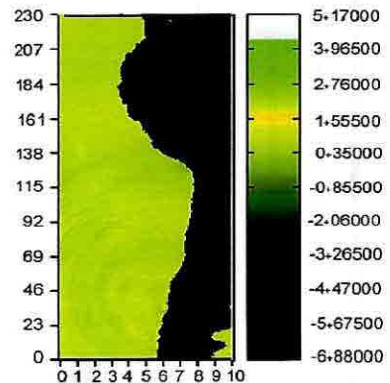
VALIDACIÓN

Los modelos fueron validados con los datos reales obtenidos de los mareógrafos de Bahía Solano, Buenaventura, Tumaco, Callao, La Libertad, Guayaquil, Islas Galápagos, Muroto-misaki, Kailua Kona, Midway y Wake Island, para las fechas correspondientes a los movimientos telúricos que originaron el tsunami. De la misma manera, se revisaron los trabajos realizados por Woods y Okal (1987), mediante la aplicación de la teoría de trazado de rayos y el modelo realizado por Guibourg et al., (1997) mediante la aplicación del modelo SWAN (Simulation of Waves in Nearshore), quienes simularon



05:20

Fig. 3 Se puede observar la desestabilidad de la corrida específica de este modelo, que se corroboró mediante comprobación cuantitativa.



07:20

Fig. 4 En este tiempo el modelo muestra alturas de ola que son consideradas fuera de la normal frente a la costa colombiana.

también el tsunami de Chile de 1960.

Origen del Tsunami	Puntos de Cálculo en el Pacífico Colombiano		
	6° 77.5°W Norte	4°N 77.7°W Centro	2°N 79°W Sur
Islas Marianas	0.03	0.07	0.12
Chile	0.63*	0.43*	0.12*
Alaska	0.01	0.07	0.06

(*) Resultado poco confiable debido a la resonancia de la onda en el cómputo del modelo. La altura calculada no corresponde a la altura de comprobación observada.

Tabla 1. Altura calculada de la ola en metros.

Origen	Tiempo de Arribo	Altura Calculada	Amenaza
Chile	7h 20'	0.63*	Débil
Alaska	13h 30'	0.07	Débil
Islas Marianas	18h 30'	0.12	Severa

(*) Resultado poco confiable debido a la resonancia de la onda en el cómputo del modelo. La altura calculada no corresponde a la altura de comprobación observada.

Tabla 2. Tiempo de arribo y altura calculada de la ola para cada modelo.

Tsunami	Calculada 2°N 82°W Ecuador	Real La Libertad Ecuador
Chile 1960	0.27	1.54
Alaska 1964	0.07	1.34

Tabla 3. Comparación de la a calculada en mar abierto vs. altura observada en la costa en metros.

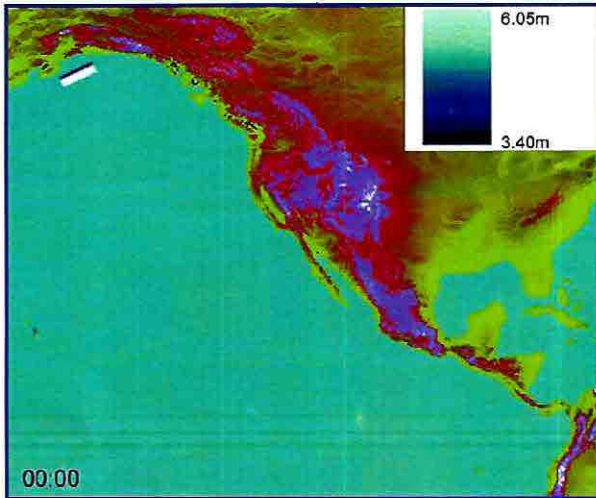


Fig. 5 Modelo del Tsunami Alaska en 1964. En la esquina superior izquierda se observa la escala de altura de ola de onda en metros y en la parte inferior izquierda el tiempo en horas y minutos. La sombra blanca frente Alaska muestra la zona de dislocación.

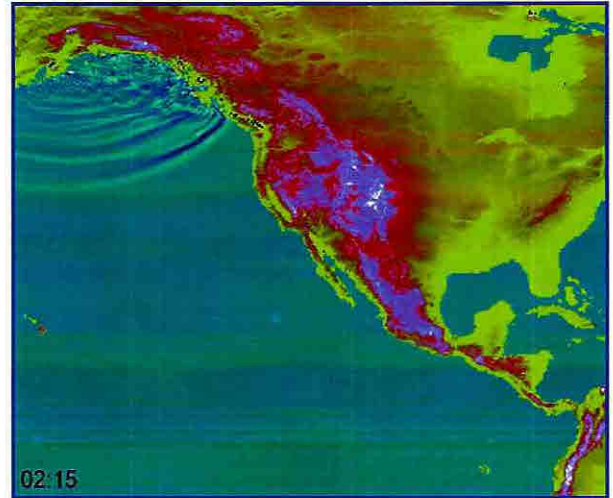


Fig. 6 Se aprecia el fenómeno de reflexión inmediata sobre la costa de Alaska y el efecto de asomeramiento de la onda sobre la costa este de los Estados Unidos.

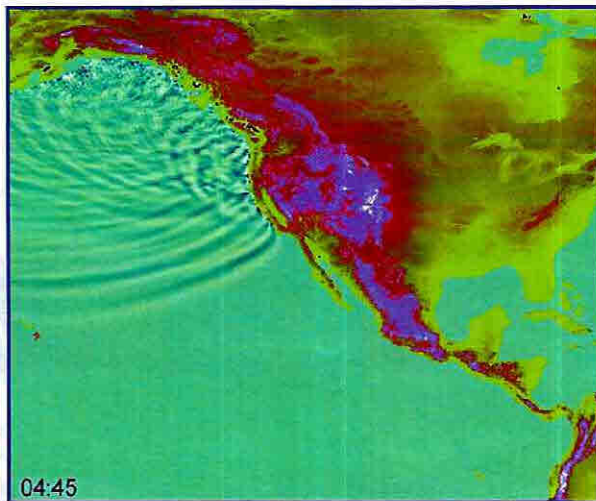


Fig. 7 Se observan múltiples reflexiones, la onda está alcanzando Hawaii, en el centro izquierdo de la figura.

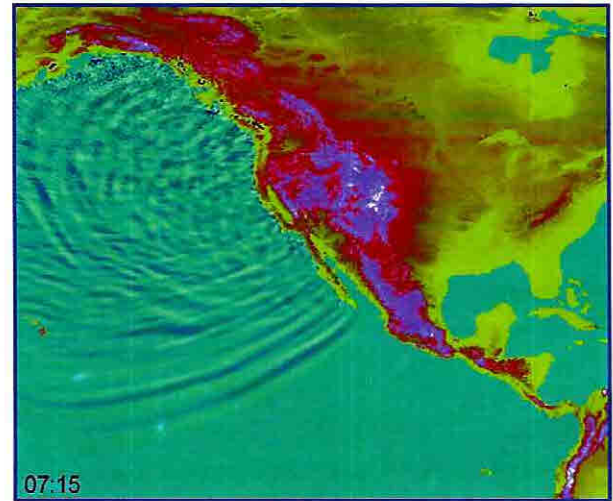


Fig. 8 Refracción de onda sobre la costa de California.

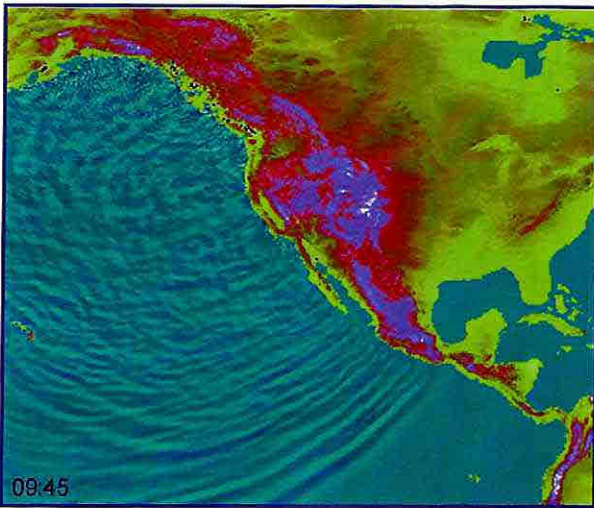


Fig. 9 La refracción permite que la onda llegue a la costa Pacífica de México.

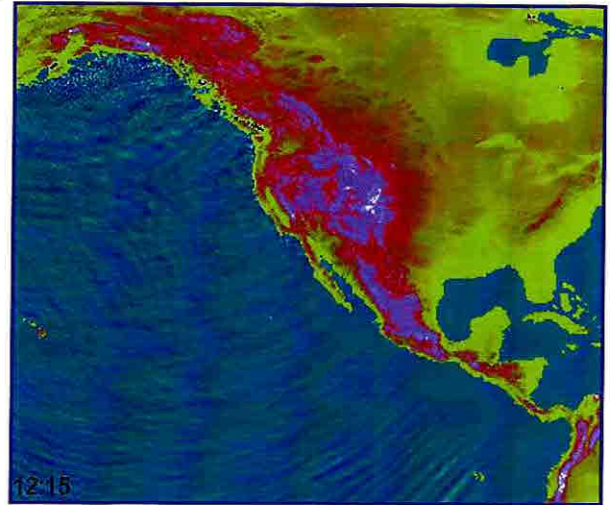


Fig. 10 Se aprecia la reflexión que produce la isla de Hawai y la sombra sobre la costa sur de Centroamérica y del Pacífico colombiano.

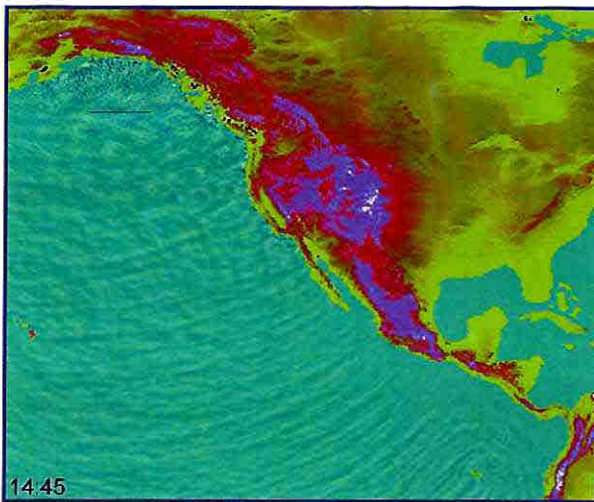


Fig. 11 La onda sobrepasa las Islas Galápagos.

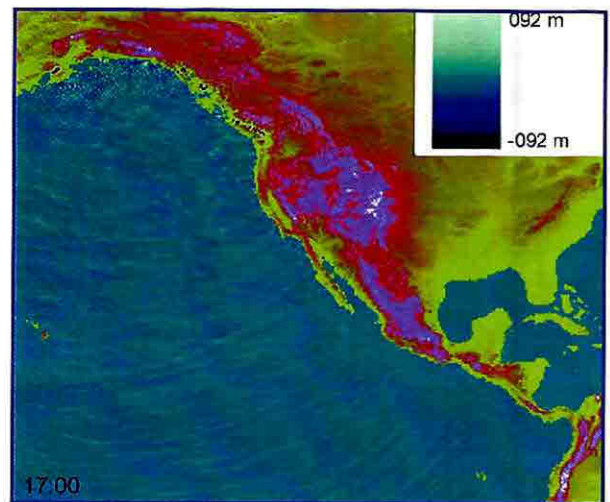


Fig. 12 La reflexión de la onda sobre las Islas Galápagos permite que esta energía alcance la costa Pacífica colombiana, sin causar, para el caso modelado, mayores perjuicios en las poblaciones ribereñas.

En la Tabla 3, en la cual se confrontaron los resultados del tsunami de Chile (1960) observados y calculados. Se esperaba que la diferencia entre las alturas de las olas calculadas, fuera relativamente igual a la diferencia de las olas observadas, sin embargo no sucedió así. Se asume, por los problemas

encontrados en el desarrollo del trabajo, que en el cómputo se pudo presentar reflexión en la línea de costa para este modelo, aumentando la altura de onda de manera desproporcionada, sin embargo el tiempo en que se desarrolló el proyecto, no fue suficiente para resolver la inconsistencia.





Fig. 13 Tsunami de las Islas Marianas (modificado). En la parte superior derecha se aprecia la escala de la altura de la onda en metros y en la inferior izquierda el tiempo de viaje de la onda, la sombra blanca a la izquierda es la zona de dislocación.



Fig. 14 Se aprecia en la superficie la fuerza del sismo submarino.

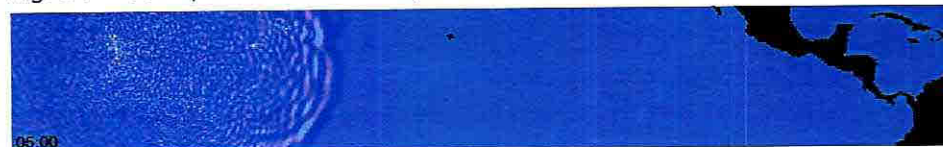


Fig. 15 La onda avanza con mucha energía hacia Colombia.



Fig. 16 El tsunami ha sobrepasado Hawaii.



Fig. 17 Sin mayor disipación de energía se acerca a Centro América.



Fig. 18 A las 15 horas alcanza el Pacífico mexicano.



Fig. 19 La onda se acerca a Panamá.



Fig. 20 Finalmente la onda alcanza la costa Pacífica colombiana, donde por su forma, se concentra la energía de la onda y alcanza alturas capaces de desencadenar catástrofes.

CONCLUSIONES

El cálculo de las ondas de tsunami provenientes de la zona Norte y de la zona Sur del continente americano que se aproximaron a las costas colombianas del Pacífico demostró que llegaron notablemente debilitadas, mientras que, el tsunami originado en el Pacífico Occidental Ecuatorial, llegó con suficiente energía, que adicionalmente se concentró en el Pacífico colombiano, lo que en casos reales significa que las dos primeras fuentes tsunamigénicas no implican consecuencias graves, mientras que la tercera fuente de tsunami puede generar catástrofes sobre los núcleos poblacionales colombianos ubicados en nuestra costa Pacífica.

Se demostró la calidad del modelo aplicado, al corroborar sus resultados con datos reales y por lo tanto se concluye que es la herramienta adecuada para pronosticar otros posibles eventos de este tipo en Colombia. Se concluye que existen dos tipos de interferencias que disipan la energía de las ondas de tsunami que pueden afectar la costa Pacífica Colombiana, estas son: la topografía de la costa circundante, que actúa como defensa de barrera y la topografía submarina, que causa efectos de directividad de la onda. Igualmente se demostró que por su forma de "U", el Pacífico colombiano, concentra las ondas de los tsunamis generados directamente en el Pacífico Occidental Ecuatorial, amplificando

los efectos destructivos de la misma.

Con base en estos resultados, se facilita la toma de decisiones por parte de los organismos involucrados, como la Armada Nacional y el Sistema Nacional de Detección y Atención de Desastres (SNDAT), en cuanto a las acciones a seguir en caso de eventos como los aquí modelados.

RECOMENDACIONES

Es posible, mediante otras rutinas del proyecto Tsunami International Modeling for Exchange (TIME) que también se encuentran en el Observatorio Sismológico de Sur Occidente, dar continuidad al presente trabajo de modelación, calculando los procesos finales de inundación y velocidad de arribo de la onda. Para el efecto es necesario ampliar la obtención de datos hidrográficos hasta la línea de costa, teniendo como referencia la más alta marea. Actualmente se carece de esta información y sin ella se hace impreciso el estudio de la zona más sensible al efecto del tsunami, la costa. También es posible, empleando como base el presente trabajo, desarrollar investigaciones en el campo socioeconómico para lograr como objetivo final el hombre, base primordial de cualquier investigación científica.

NOTA: El presente artículo fue desarrollado por el autor siendo funcionario del Centro de Control de Contaminación del Pacífico, con información obtenida en dicho Centro.

BIBLIOGRAFÍA

- GHDB. Global Hypocenter Data Base. USGS/NEIC, 1994.
- Goto, C. e Y. Ogawa, Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. Japan. Reporte Técnico, 1982, 19 p.
- Guibourg, S., P. Heinrich, y R. Roger, Numerical modeling of the 1995 Chilean tsunami. Impact on French Polynesia, Geo. Res. Lett., France, Vol. 24, No 7, April 1, 1997, p. 775-778.
- Imamura, F y N. Shuto, Numerical simulation of propagation of far field tsunamis, Reporte Técnico, septiembre 1992, 29 p.
- Kanamori, H, Rupture Process of subduction zone earthquakes, Ann. Rev. Earth Planet Sci. Vol. 14, 1986, p. 239-322.
- Kuroiwa, J, Tsunamis, population evacuation and land use planning for disaster mitigation, localities studied in Peru, (1981-1984), Lima y Geneva, 1995, 28 p.
- Mena, R, Una falsa alarma. Revista semestral de la red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina, especial predicciones, pronósticos, alerta y respuestas sociales. Enero - junio de 1996, No. 6, año 4, Lima, 1996, 28 p.
- Mader, C. L., Numerical modeling of water waves, Los Alamos Series in Basic and Applied Sciences. David, H. and L. M., Simmons, Jr, (ed), Vol 8. California, U.S.A. 1988.
- Meyer, Hj. y A. Velásquez, Conferencia Interamericana sobre reducción de los desastres naturales, desarrollada en Cartagena de Indias: 'Prevención de tsunami en Colombia'. Observatorio Sismológico, Universidad del Valle - Colombia. 1994.
- Meyer, Hj. y A. Velásquez, Aproximación al riesgo por tsunami, Reporte Técnico, Observatorio Sismológico de Sur Occidente, Universidad del Valle - Colombia, 1972.
- Okal, E. A., Seismic parameters controlling far-field tsunami amplitudes: A review. Natural Hazards 1, Kluwer Academic Publishers, 1988, 69p.
- Okal, E.A., Effects of variable bathymetry on the amplitud of telesismic tsunami: a ray tracing experiment, 1987, 35p.
- Robert, J. A. y Chen-Wu, Chien, The tsunami of march 28, 1964, as recorded at tide stations. ESSA Reporte Técnico, 1967, 16p.
- Soloviev, S. L. y CH. N. Go., Catalogue of tsunamis on the western shore of the Pacific Ocean. Translated from Russian by Slavonic Languages Section of Canada. USSR, 1984, 640 p.