



Atlas de recorrido para Tsunamis del Atlántico Norte

Course Atlas for North Atlantic Tsunamis

Rafael Pérez-Parrado✉

Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

Resumen

Aunque en el Atlántico ocurren menos tsunamis que en otras regiones del mundo, como por ejemplo el Océano Pacífico y el Océano Índico, los hechos demuestran que si se producen estos fenómenos en nuestra región. Los tsunamis son ondas de gravedad largas similares a las mareas y a las surgencias producidas por los ciclones tropicales. Ya que los tsunamis son catalogados como ondas largas, el tiempo de travesía de estos puede ser computado a partir de una sola variable: la profundidad del agua, al menos en el orden cero. Los tsunamis provocados por terremotos submarinos constituyen el objetivo principal de este trabajo ya que la mayoría de los mismos se originan por terremotos, aunque también se incluyen los sitios donde existe la posibilidad de originarse por volcanes o deslizamientos. Haciendo una comparación con el océano Pacífico los tsunamis son menos frecuentes en el océano Atlántico, es por eso que en esta región no existe un sistema de alerta temprana hasta ahora, a diferencia del Pacífico donde existe este sistema de alerta desde 1949, aunque la XXIII Asamblea General de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (COI) adoptó, en junio del 2005, la resolución de creación de un Grupo de Coordinación Intergubernamental (GCI), para el Sistema de Alerta de Tsunami y otros riesgos costeros, en el Caribe y regiones adyacentes (SATRCC). Atlas de tiempo recorrido para tsunamis en nuestra zona han sido elaborados en Canadá a partir de los trabajos de Murty (1977) y Murty et al., (1987) y en los Estados Unidos por el NOAA National Weather Service, U.S. Tsunami Warning Center. Se obtiene como resultado un ATLAS digital de tsunamis para el Océano Atlántico Norte. En este Atlas se muestra el tiempo de recorrido de la primera ola del tsunami originado en 98 emplazamientos de 41 países de la cuenca Atlántica Norte y en 17 puntos del Océano Atlántico. El motivo primario de la elaboración de este Atlas fue la de proteger la isla de Cuba y los países de la Cuenca del Caribe del posible impacto de un tsunami originado en nuestra región geográfica. Los mapas de recorrido presentan la posición de la primera ola del Tsunami con intervalos de media hora a partir del momento inicial, desde el epicentro.

Palabras clave: Tsunamis, terremotos, océanos, volcanes, sistemas de alerta

✉ Autor para correspondencia: *Rafael Pérez-Parrado*. E-mail: rafael.perez@insmet.cu

Recibido: 30/11/2017

Aceptado: 26/3/2018

Abstract

Although the Atlantic occur less tsunamis that in other regions of the world, as for example the Pacific Ocean and the Ocean Indian, the facts show that if these phenomena are produced in our region. Tsunamis are long gravity waves similar to the tides and the upwelling caused by tropical cyclones. Since tsunamis are classified as long waves, the crossing of these time can be computed from a single variable depth of the water, at least in the zero order. The Tsunamis caused by undersea earthquakes are the main objective of this work since most of them are caused by earthquakes, although the sites where there is the possibility arise from volcanoes and landslides are also included. Making a comparison with the Pacific Ocean tsunamis are less common in the Atlantic Ocean, it is why in this region there is no early warning system so far, unlike the Pacific where there is this warning system since 1949, although the XXIII General Assembly of the IOC adopted in June 2005 the resolution to create an Intergovernmental Coordination Group (ICG) for the Tsunami Warning System and other coastal risks in the Caribbean and Adjacent Regions (SATRCC). Atlas of travel time for tsunamis to our area have been made in Canada starting from the works of Murty (1977) and Murty et al., (1987) and in the United States by the NOAA National Weather Service, U.S.Tsunami Warning Center. As result a Digital Tsunami Atlas is obtained for the North Atlantic Ocean. In this Atlas it shows the travel time of the first Tsunami wave caused in 98 locations in 41 countries in the North Atlantic basin and the Atlantic Ocean 17 points. The primary purpose of preparing this Atlas was to protect the island of Cuba and the countries of the Caribbean Basin of the possible impact of a tsunami caused in our geographic region. Route maps show the position of the first tsunami wave with half-hour intervals from the starting time from the epicenter.

Key words: Tsunami, earthquake, ocean, volcano, alert system

INTRODUCCIÓN

En comparación con el océano Pacífico en el Atlántico los Tsunamis ocurren con menos frecuencia, es por eso se ha prolongado tanto la creación de un sistema Regional de Alerta para Tsunamis en el Atlántico, aunque Atlas de recorrido para tsunamis para nuestra zona han sido elaborados en Canadá partir de los trabajos de [Murty \(1977\)](#) y [Murty et al., \(1987\)](#) y en los Estados Unidos por el NOAA National Weather Service, U.S.Tsunami Warning Center.

Si bien en el Atlántico ocurren menos tsunamis que en otras regiones del mundo, los hechos demuestran que si se producen estos fenómenos en nuestra región y así tenemos los eventos de 1755, conocido como el tsunami de Portugal, el tsunami de Puerto Rico 1918 (ola de 6 metros) y el tsunami de República Dominicana y Puerto Rico en 1946 (ola de 5 metros), estos últimos causando más de una

centena de muertos cada uno. Un peligro potencial de gran magnitud es la posibilidad de una erupción en el volcán cubre vieja en la isla de la Palma, Islas canarias, que podría originar un super tsunami, [Ward y Simon \(2001\)](#).

Los tsunamis pueden generarse por diferentes mecanismos tales como, terremotos submarinos, erupciones volcánicas bajo el agua, deslizamientos submarinos de tierra [Harbitz \(1991\)](#), escapes violentos de gases en el océano, impactos de asteroides en los océanos, grandes explosiones químicas o nucleares producidas en aguas poco profunda de los océanos y repentina liberación de agua derretida de los glaciales que ocurrieron a finales de la última edad de hielo.

Los tsunamis son ondas de gravedad largas similares a las mareas y a las surgencias producidas por los ciclones tropicales. Ya que los tsunamis son catalogados como ondas largas, el tiempo de travesía de estos puede ser computado a partir de una sola variable

(Thompson, 1969; Mader *et al.*, 1993b) la profundidad del agua, aunque hay algunas correcciones de primer orden, sin embargo para propósitos prácticos estas correcciones pueden ser ignoradas.

Para establecer un sistema de alerta debe ofrecerse información sobre la hora de llegada, amplitud máxima y extensión de la inundación; ya que la amplitud y la inundación del Tsunami dependen de la magnitud del fenómeno que la produce y el tiempo de llegada solo de la profundidad, en este trabajo solo se presenta el tiempo de llegada de la primera ola del tsunami ya que esta es la información básica que se requiere en cualquier sistema de alerta para tsunamis.

Por todo lo anterior, es obvio que para Cuba es importante disponer de algún método para conocer el recorrido de un tsunami en nuestra región, debido al potencial destructivo de estos fenómenos, por eso el propósito primario de este trabajo fue la elaboración de un Atlas, para alertar y proteger a la isla de Cuba y a los países de la Cuenca del Caribe ante el posible impacto de un tsunami originado en nuestra región geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación describimos el proceso por pasos para la realización del trabajo, que está constituido de tres secciones.

Aproximación Físico-Matemática del Problema

Un tsunami es una onda de gravedad transverso-vertical, para excluir la influencia de las ondas horizontales restringiremos el movimiento al plano (x,z) y para eliminar las ondas de sonido consideraremos el fluido incompresible; también consideraremos el fluido homogéneo con dos capas de diferente densidad y una superficie de discontinuidad separándolas, si la densidad en la capa inferior es mayor que en la capa superior el sistema se encuentra en estratificación estable Thompson, Ph. D.(1969), Tinti S. Genesis and Impact of

Tsunamis on the European Coasts Tsunami Warning and Observations (1997).

Además consideraremos que existe algún nivel en la capa superior en el cual el gradiente de presión desaparece. Por lo tanto de la ecuación hidrostática $dp = -\rho g dz$ vemos que al gradiente de presión se desvanece en cualquier parte de la capa superior,

Es más si h representa la altura de la superficie de discontinuidad de densidad, la ecuación hidrostática nos dice que el gradiente horizontal de presión en la capa inferior (con densidad ρ_1):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = g (\rho_1 - \rho_2) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

Una de las consecuencias significativas de la [ecuación 1](#) es que la fuerza del gradiente de presión es independiente de la altura, ya que tanto ρ_1 como ρ_2 son constantes, por lo tanto si la velocidad inicial es independiente de la altura, se deduce de la [ecuación \(2\)](#) que las aceleraciones también son independientes de la altura y esto implica que la velocidad también debe permanecer independiente de la altura todo el tiempo si lo fue inicialmente. Podemos decir que u permanece constante con la altura con la seguridad de que es dinámicamente consistente

$$\frac{du}{dt} + fv + \frac{1}{\rho} \partial p / \partial x = 0 \quad (2)$$

La ecuación apropiada para este modelo se obtiene haciendo v y $\partial u / \partial z$ igual a cero en la [ecuación 2](#) y sustituyendo para $\partial p / \partial x$ en la [ecuación 1](#). Entonces en la capa inferior:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + g \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \right) \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Ya que ambas capas son incompresibles y $v=0$ la ecuación de continuidad se reduce a:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Integrando esta ecuación con respecto a la altura desde $z=0$ hasta $z=h$ y siendo u independiente de z hallamos que:

$$h \frac{\partial u}{\partial x} + wh - w_0 = 0 \quad (5)$$

Para suprimir las oscilaciones forzadas supondremos que la superficie terrestre ($z=0$) es absolutamente plana y que $w=0$ en la

superficie, como el fluido contiguo a la discontinuidad de densidad está constituido por la misma lámina de partículas de fluido y sigue el movimiento de esta superficie, entonces la velocidad $w_h = dh/dt = \partial h/\partial t + u \partial h/\partial x$ y la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

Esta ecuación junto a la [ecuación \(3\)](#) constituyen un sistema completo de dos ecuaciones con las variables u y h .

Como es habitual el carácter general de las soluciones de las [ecuaciones 3](#) y [6](#) se encontrarán con el método de las perturbaciones, comenzaremos con un estado de equilibrio en el cual $u = \bar{u}$ y $h = H$. De tal forma que:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Y finalmente:

$$C = \bar{u} \pm \sqrt{gH \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)} \quad (8)$$

Donde:

C - Velocidad de la onda

\bar{u} - la velocidad media de las corrientes

g - la aceleración de la gravedad

H - la profundidad del Océano

ρ_1 - densidad del agua

ρ_2 - densidad del aire

Si las capas superior e inferior son aire y agua $\rho_1 > \rho_2$ entonces, despreciando los términos que involucran a las densidades y la velocidad media del fluido que tienen un orden de magnitud menor, en una aproximación de orden cero, utilizamos la expresión siguiente:

$$C = \sqrt{gH} \quad (9)$$

Con un error de más menos un minuto por cada hora de recorrido.

Calculo de las isócronas

Con la base batimétrica y las coordenadas geográficas de la rejilla se pueden calcular el tiempo de recorrido para todos los puntos de la

misma y después hacer un análisis de isócronas.

Los sitios de cálculo se han seleccionado en: diferentes países de la cuenca Atlántica Norte 115 puntos del Océano Atlántico, fig. 1, con los siguientes criterios,

- Lugares donde han ocurrido terremotos y / o erupciones volcánicas,
- Regiones con grandes probabilidades de que ocurran terremotos y por supuesto Tsunamis (zonas de contacto entre placas tectónicas, volcanes)
- Ciudades con gran cantidad de habitantes y otros sitios importantes

Calculo de los recorridos

El tiempo de recorrido se computa a partir de las ecuaciones obtenidas en el desarrollo de la base teórica ([Holton, 1990](#)) y al principio de Huygens 1690, que establece que todos los puntos en un frente de onda son fuente de origen para ondas esféricas secundarias; a partir del punto inicial se calculan todos los demás tiempos de los puntos que lo rodean. El punto con el tiempo menor de recorrido es tomado como el próximo lugar de origen.

El punto origen se mueve continuamente siguiendo la línea de menor tiempo total del recorrido, hasta que todos los puntos son evaluados.

La base batimétrica y por lo tanto la rejilla utilizada en el presente trabajo fue la ETOPO-2 del NGDC de los Estados Unidos con una resolución de 2 minutos ([Figura 1](#)).

RESULTADOS

Se obtiene un ATLAS digital animado de tsunamis para el Océano Atlántico Norte, ATLAS organizado por continentes, países y ciudades o lugares de origen de los tsunamis, En el mismo se muestra cada media hora, la posición geográfica de la primera ola de los tsunamis originados en 98 emplazamientos de 41 países de la cuenca Atlántica Norte y en 17 puntos del Océano Atlántico. La [figura 2](#) muestra un ejemplo del resultado obtenido, para un tsunami originado en (18.5N-67.5W).

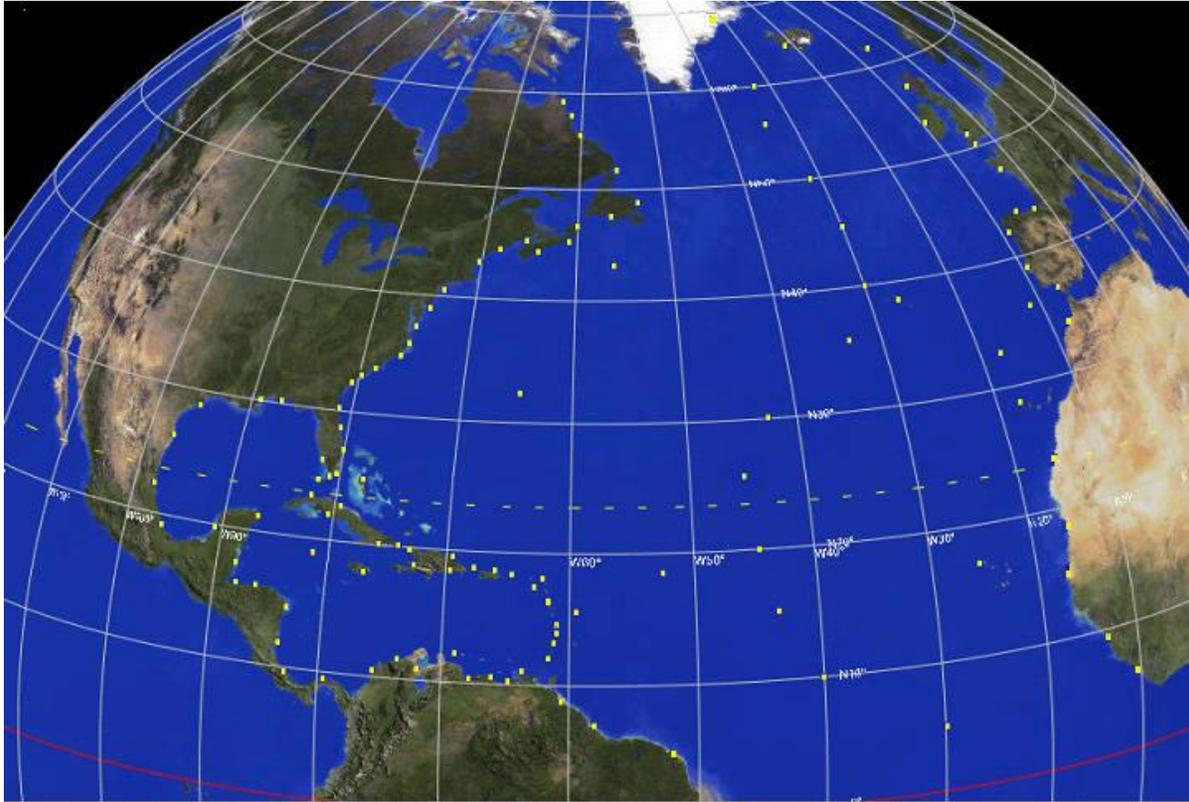


Figura 1. Localidades seleccionadas para la modelación de los recorridos

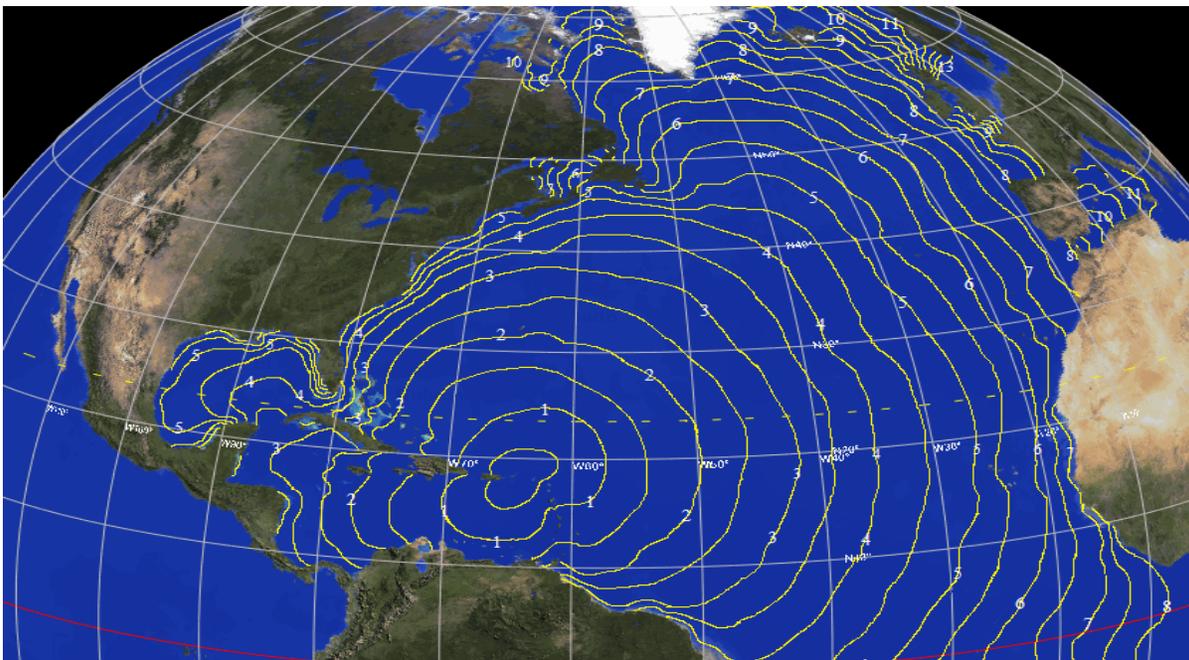


Figura 2. Mapa con las posiciones de la primera onda un Tsunami cada media hora, a partir de la localización geográfica (18.5N-67.5W) y momento de origen

CONCLUSIÓN

El ATLAS digital presentado constituye un paso firme en el establecimiento de un sistema de alerta en Cuba para tsunamis en la cuenca atlántica norte.

RECOMENDACIÓN

Se debe continuar trabajando en el desarrollo de otros modelos específicos para obtener toda la información necesaria para completar el sistema de alerta.

REFERENCIAS

- Holton J.R. (1990). "Introducción a la Meteorología Dinámica". Segunda Edición (en Español). Instituto Nacional de Meteorología. Prensa Hispanoamericana. 423 p.
- Harbitz C. (1991). "Numerical simulation of slide generated water waves". *Science of Tsunami Hazards* .9, 15-22.
- Huygens Chr., "Traité de la Lumiere" (completed in 1678, published in Leyden in 1690).
<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo.html>
- Mader C.L., D.W. Moore and G.F. Carrier (1993b). "Numerical tsunami propagation study-III", *Science of Tsunami Hazards* 11, 93-106.
- Murty T.S. (1977). "Seismic sea waves—Tsunamis" (Bulletin no. 198). Ottawa Fisheries Research Board of Canada.
- Murty T. S., Saxena, N.K., Sloss, P.W., and Lockridge, P.A. (1987). "Accuracy of tsunami travel times charts". *Marine geodesy*, 11, 89-102.
- Página Web de la NOAA National Weather Service, U.S. Tsunami Warning Centers.
- Stewart Robert H. (2005), Chapter 17- "Coastal Processes and Tides". Department of Oceanography, Texas A&M University Stewart@ocean.tamu.edu.
- Thompson, Ph. D. (1969). "Gravity Waves. Lectures on Numerical Short Range Weather Prediction", *WMO*, 50-60.
- Tinti S. (1997). "Genesis and Impact of Tsunamis on the European Coasts Tsunami Warning and Observations—European Union Project" (ENV-CT96-0297).
- Ward Steven N. and Simon Day (2001). "Cumbre Vieja Volcano -- Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands". American Geophysical Union.