

# Meteotsunamis en el Puerto de Fajardo

---

Por

Edwin Alfonso-Sosa, Ph. D.

Ocean Physics Education, Inc.

22-ago-2014

## Introducción

El término meteotsunami se usa para designar una serie de ondas en un puerto o bahía que tienen frecuencia y amplitud similar a la de un tsunami generado por terremotos, deslizamientos o erupción volcánica, pero a diferencia de estos, su origen se asocia a un disturbio atmosférico tales como: ondas gravitacionales atmosféricas, un pulso en la presión barométrica, el paso de un frente, o de una línea de fuertes vientos (*squall*); capaces de generar una ola larga barotrópica en mar abierto, entrar en resonancia con ella y amplificarla a medida que se acerca a la costa. Una vez alcanza la entrada del puerto o bahía es capaz de forzar una serie de ondas, que entran en una segunda resonancia con el puerto (o bahía) que las amplifica aún más. El meteotsunami solamente ocurre en ciertos puertos y bahías donde es posible esta doble resonancia. Una excelente defensa de la controversia si esto es o no es un tsunami es presentada por S. Monserrat et al. (2006). Resulta práctico determinar la respuesta de un puerto a la ola larga del meteotsunami, ya que nos sirve para reconocer la susceptibilidad de ese mismo puerto a tsunamis generados por sismos.

El Puerto de Fajardo, es un puerto pequeño, localizado en la Bahía de Fajardo, en el extremo Este de la Isla de Puerto Rico. La Bahía de Fajardo esta bordeada por cayos y por arrecifes someros que la protegen del oleaje de corto periodo. La entrada principal a la Bahía es al NE, pero tiene una entrada más estrecha y de poca profundidad en la dirección ESE (Figura 1, flecha). Es el puerto principal para el transporte de personas hacia las Islas de Culebra y Vieques. Hay varias marinas con muelles para botes y yates, es uno de los lugares de mayor actividad marítima en Puerto Rico. A partir del 2011, se comenzó a medir cada 6 minutos la altura del agua en el puerto, por un mareógrafo instalado en la estación mareal número 9753216 por NOAA/NOS/CO-OPS. Dentro del periodo 2011 al 2014 el mareógrafo registró 6 eventos de meteotsunami.

En años recientes en Puerto Rico se han reportado meteotsunamis generados localmente (Alfonso-Sosa, 2012) y en las aguas al Este de los Estados Unidos y que viajan, con una rapidez igual a 455 MPH, hasta llegar a Puerto Rico (Alfonso-Sosa, 2014). Los eventos locales han sido generados por disturbios atmosféricos tales como: ondas tropicales, huracanes y saltos en la presión atmosférica (vea Tabla 1). Los meteotsunamis ocurridos en el Puerto de Fajardo son iniciados por un pulso en la presión atmosférica. Medidas de presión atmosférica registradas por el barómetro de la estación mareal número 9752695, localizada en Esperanza, Vieques, detectan los pulsos en presión no menos de media

hora antes de que ocurra el meteotsunami en el Puerto de Fajardo. En algunas ocasiones, ya pasadas unas pocas horas del primer pulso entonces ocurre un segundo pulso, provocando a su vez un segundo meteotsunami en el Puerto de Fajardo.

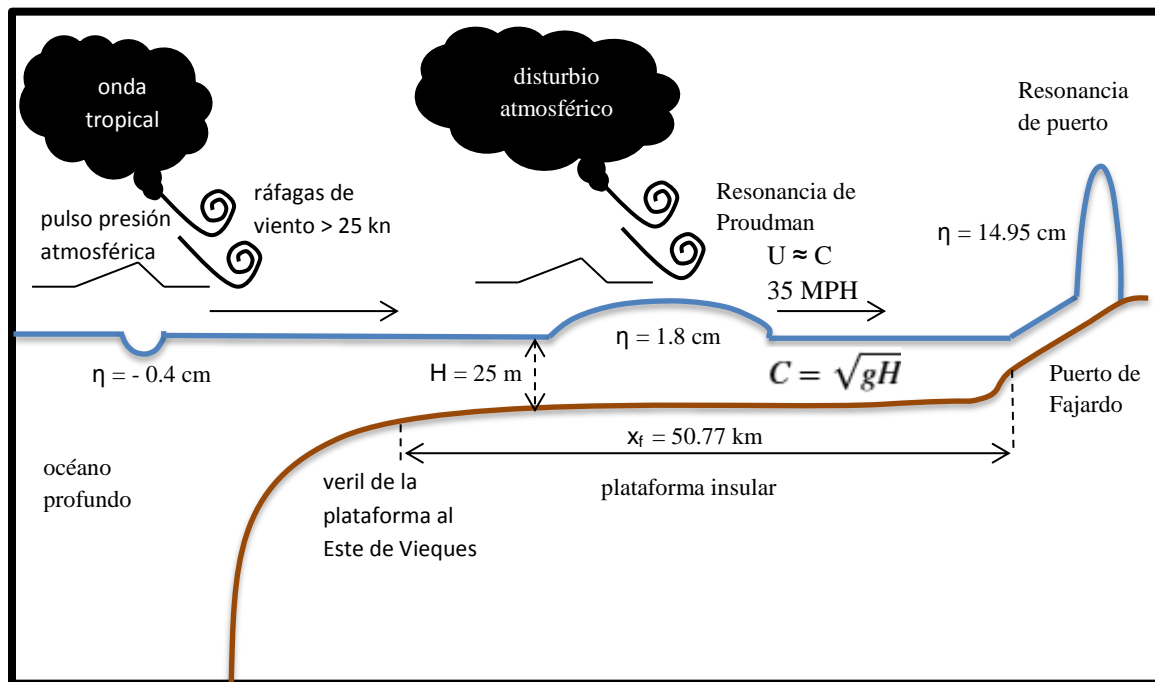
El mecanismo que usamos para explicar el meteotsunami en el Puerto de Fajardo es el mismo que se planteó por primera vez para explicar el meteotsunami (*abiki*) en la Bahía de Nagasaki en Japón (Hibiya & Kajiura, 1982).

Tabla 1. Lista de eventos de meteotsunamis ocurridos entre los años 2011-2014.

Time of Max Height (LST)	Location	Height (feet)	Height (cm)	Atmospheric Event	Generation Area
8/16/2011 14:30	Fajardo Harbor	0.61	18.7	Tropical Wave	Local
8/16/2011 16:30	Bahia Salinas	0.61	18.6	Tropical Wave	Local
8/16/2011 22:42	Fajardo Harbor	0.83	25.2	Tropical Wave	Local
8/23/2011 11:06	Bahia Salinas	0.25	7.6	Hurricane Irene	Local
8/3/2012 20:18	Fajardo Harbor	1.15	35.1	Tropical Storm Ernesto	Local
8/4/2012 0:24	Fajardo Harbor	0.79	24.1	Tropical Storm Ernesto	Local
<b>8/12/2012 23:18</b>	<b>Fajardo Harbor</b>	<b>1.27</b>	<b>38.9</b>	<b>Tropical Wave</b>	<b>Local</b>
4/11/2013 1:09	Mona Island	0.50	15.3	Derecho	US East Coast
6/13/2013 16:53	Mona Island	0.30	9.0	Derecho	US East Coast
9/30/2013 2:48	Magueyes Island	0.28	8.5	Atm. Pressure Jump	Local
8/8/2014 12:53	Fajardo Harbor	0.98	29.9	Tropical Wave	Local

Data compiled by Dr. Edwin Alfonso-Sosa, Ocean Physics Education, Inc., 2014

Diagrama del meteotsunami que impactó el Puerto de Fajardo el 8-AGO-2014. No está a escala.



## Cronología de eventos responsables en generar un meteotsunami en el Puerto de Fajardo

Basándonos en las observaciones de meteotsunamis en el Puerto de Fajardo entre los años 2011 al 2014. Es posible describir la secuencia de eventos que preceden al meteotsunami en el Puerto de Fajardo. Veamos la secuencia de eventos. Vea el diagrama anterior.

1. En el mes de agosto, una onda tropical fuerte se mueve hacia el Oeste desde África hacia Puerto Rico con una rapidez promedio de 25 MPH. La onda tropical genera un extenso campo de vientos (15-25 kn), con algunas áreas concentradas de vientos más fuertes (25-30 kn). A la onda le antecede una región de aire bastante seco y estable. Ocurre una transición bastante rápida (pocas horas) en las condiciones atmosféricas.
2. Acompaña a la onda tropical fuerte un pulso en la presión atmosférica. El pulso puede alcanzar una magnitud entre 0.4 mb hasta 1.6 mb. El pulso de presión atmosférica se desplaza con una rapidez, U, igual a 35 MPH. El aumento en presión deprime el nivel de la superficie del mar unos -0.4 cm hasta -1.3 cm, debido al efecto de barómetro invertido estático. Esta perturbación de la superficie del mar tiene el efecto de generar una ola de gravedad con longitud de onda larga.
3. Cuando el pulso de presión cruza el veril de la plataforma insular y se encuentra en aguas de poca profundidad ( $H = 25$  m), la celeridad de la ola larga, C, y la del pulso atmosférico, U, se aproximan a ( $U \approx C = 35$  MPH). Esto permiten que el pulso y la ola se acoplen durante el viaje de 50.8 km, que es la distancia que separa al Puerto de Fajardo, del veril de la plataforma localizado al ESE ( $115^\circ$  T) del mismo (Figura 2). Esta distancia se recorre aproximadamente en no menos de 30 minutos.
4. Durante ese tiempo ocurre la Resonancia de Proudman (Proudman, 1929), que permite un aumento en la amplitud de la ola larga que se acerca al Puerto de Fajardo. La ola aumenta su amplitud entre 1.4 a 4.5 veces. La amplitud de la ola justo antes de entrar al Puerto se calcula puede variar entre 1.5 cm y 3.9 cm.
5. La ola reduce dramáticamente su velocidad al entrar al Puerto de Fajardo y comienza a ganar amplitud rápidamente. La forma del Puerto, la anchura y profundidad del mismo, determinaran la amplitud final del meteotsunami. La amplitud final registrada por el mareógrafo puede variar entre 9.3 cm y 19.4 cm; equivalente a alturas entre 18.6 cm y 38.8 cm.

La Tabla 2 detalla las observaciones que sustentan la secuencia de eventos antes descrita.

Tabla 2. Lista de eventos de meteotsunami en el Puerto de Fajardo, durante los años 2011-14.

Meteotsunami Events at Fajardo Harbor, Puerto Rico (Years 2011-2014) compiled by Edwin Alfonso-Sosa (2014).												
Location	Date (GMT)	Atm. pressure Jump at the sea surface $\Delta p$ (mb, hPa)*	Static inverted Barometer Response, $\Delta \eta^*$ (m)	Arrival Time of Pressure Jump	Speed of Atmospheric Disturbance U (MPH)	Distance from the pressure maximum to the front L1 (m)	Distance travelled by the front xf (m)	Maximum elevation of the water level $\Delta \eta$ (m)	Amplification factor $ \Delta \eta / \Delta \eta^* $	Long Wave Celerity C (MPH)	Amplitude in the harbor (m)	Harbor Amplification Factor (m)
Fajardo, PR	8/16/11 18:30	1.3	-0.013	8/16/11 18:30	38.64	1.88E+04	5.08E+04	1.75E-02	1.4	35.0	0.0934	5.3
Fajardo, PR	8/17/11 2:42	0.6	-0.006	8/17/11 2:42	32.20	1.04E+04	5.08E+04	1.46E-02	2.4	35.0	0.1261	8.7
Fajardo, PR	8/4/12 0:18	0.9	-0.009	8/4/12 0:12	38.64	1.25E+04	5.08E+04	1.82E-02	2.0	35.0	0.1753	9.6
Fajardo, PR	8/4/12 4:24	0.6	-0.006	8/4/12 4:18	38.64	6.26E+03	5.08E+04	2.43E-02	4.1	35.0	0.1204	5.0
Fajardo, PR	8/13/12 3:18	1.6	-0.016	8/13/12 3:06	21.47	1.04E+04	5.08E+04	3.88E-02	2.4	35.0	0.1943	5.0
Fajardo, PR	8/8/14 16:53	0.4	-0.004	8/8/14 16:48	34.86	5.65E+03	5.08E+04	1.79E-02	4.5	35.0	0.1495	8.3

\*Esperanza, Vieques

Length of Platform along  $115^\circ$ T

## Características del Meteotsunami del Puerto de Fajardo

Las Figuras 3-6 muestran la señal de la altura del agua en el Puerto de Fajardo, luego de haberse removido la marea usando el método EMD (Huang et al., 1998), dado que la señal es no-estacionaria. Todos los eventos identificados en la Tabla-2 se muestran en las figuras. El meteotsunami se destaca como una fluctuación severa en la señal de la altura del agua, seguida de oscilaciones o seiches de menor altura. Sin embargo, algunas de la figuras muestran que a las pocas horas (3 a 8 horas) ocurre un segundo meteotsunami generado por un segundo pulso de presión atmosférica. En algunos casos el segundo meteotsunami es de mayor altura que el primero (Figura 3). Por lo tanto un meteotsunami puede repetirse a las pocas horas de haber ocurrido el primero.

El meteotsunami del 13-AGO-2012 fue el de mayor amplitud (19.4 cm), generado por un pulso de presión de 1.6 mb, el mayor registrado. Por el contrario, el meteotsunami del 16-AGO-2011 fue el de menor amplitud (9.3 cm), a pesar que el pulso de presión atmosférica fue de 1.3 mb, el segundo más grande. Por lo tanto, la magnitud del pulso atmosférico no es indicativa de la amplitud final del meteotsunami en el puerto. Otro resultado interesante es que la amplitud del meteotsunami en el puerto es inicialmente grande pero decae rápidamente. Es decir, que no se generan seiches de similar amplitud que perduren por varias horas, como se ha observado en otros puertos o bahías tales como: Charlotte Amalie, Puerto Real, Bahía Salinas. Esta característica lo hace diferente a otros puertos en Puerto Rico e Islas Vírgenes.

La rapidez de los pulsos atmosféricos que muestra valores entre 22 MPH y 39 MPH, le permite al pulso acoplarse a la ola larga durante un tiempo poco mayor de media hora. Una vez se completan los 50 km de travesía, la amplitud incrementa entre 2 a 4.5 veces. La amplitud mayor calculada fue 3.9 cm, que ocurrió el día 13-AGO-2012. Es importante, entender la dinámica de trasmisión de energía del pulso a la ola larga durante la travesía de 50 km, en otras palabras la Resonancia de Proudman. El resultado de ese proceso determinará qué tan grande será el meteotsunami.

Nuestros resultados apuntan a que el Puerto de Fajardo tiene la capacidad de amplificar la ola larga entre 5 a 10 veces. El 13-AGO-2012, la amplitud incrementó desde 3.9 cm hasta 19.4 cm, aproximadamente 5 veces el valor inicial.

Finalmente, es necesario destacar que todos los meteotsunamis en el Puerto de Fajardo han ocurrido durante el mes de agosto, cuando ondas tropicales fuertes pasan por nuestra región. No obstante el periodo de ondas tropicales fuertes se extiende hasta septiembre-octubre. Nuestros datos abarcan sólo cuatro años (2011-2014), es de suponer que al extender los años de observación, logremos registrar eventos en el mes de septiembre u octubre. Al menos estos resultados obligan a que durante el mes de agosto, los nautas que tienen embarcaciones amarradas a muelles que bordean la Bahía de Fajardo deben ejercer cautela.

## Referencias

Alfonso-Sosa, Edwin, 2014. Reporte final del meteotsunami ocurrido en el Puerto de Fajardo el 8 de agosto del 2014. Ocean Physics Education, Inc., 15 pp.

[http://www.academia.edu/7985135/Reporte\\_final\\_del\\_meteotsunami\\_ocurrido\\_en\\_el\\_Puerto\\_de\\_Fajardo\\_el\\_8\\_de\\_agosto\\_del\\_2014](http://www.academia.edu/7985135/Reporte_final_del_meteotsunami_ocurrido_en_el_Puerto_de_Fajardo_el_8_de_agosto_del_2014)

Alfonso-Sosa, Edwin, 2014. *Calculating the Speed of a Transatlantic Meteotsunami on June 13, 2013*. Ocean Physics Education, Inc., 9 pp.

[https://www.academia.edu/5592148/Calculating\\_the\\_Speed\\_of\\_a\\_Transatlantic\\_Meteotsunami\\_on\\_June\\_13\\_2013](https://www.academia.edu/5592148/Calculating_the_Speed_of_a_Transatlantic_Meteotsunami_on_June_13_2013)

Alfonso-Sosa, Edwin, 2014. Meteotsunamis golpean a Puerto Rico. La Regata, Año 2014, Vol. 16 No.1 p.28. <http://www.laregatapr.com/links/arch.pdf/1401.pdf>

Alfonso-Sosa, Edwin, 2014. *Coastal Oscillations after the Passage of Hurricane Irene*. Ocean Physics Education, Inc., 14 pp.

[http://www.academia.edu/6216087/Coastal\\_Oscillations\\_After\\_the\\_Passage\\_of\\_Hurricane\\_Irene](http://www.academia.edu/6216087/Coastal_Oscillations_After_the_Passage_of_Hurricane_Irene)

Alfonso-Sosa, Edwin, 2012. Primer Reporte de un meteotsunami en la costa caribeña de Puerto Rico. Ocean Physics Education, Inc., 24 pp.

[https://www.academia.edu/4951196/Primer\\_Reporte\\_de\\_un\\_Meteotsunami\\_en\\_la\\_Costa\\_Caribena\\_de\\_Puerto\\_Rico](https://www.academia.edu/4951196/Primer_Reporte_de_un_Meteotsunami_en_la_Costa_Caribena_de_Puerto_Rico)

Huang, N. E., Shen, Z., and S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proc. R. Soc. London Series A 454: 903-995.

Hibiya T. and K. Kajiura, 1982. Origin of the Abiki Phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. Journal of the Oceanographic Society of Japan, Vol. 38, pp. 172-182.

Monserrat S., I. Vilibić, y A. B. Rabinovich, 2006. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 6, 1035–1051.

<http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/1035/2006/>

Proudman, J., 1929. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure, Geophys. Suppl. Mon. Notices R. Astr. Soc., 2(4), 197–209.

Referencias Electrónicas:

NOAA/NOS/CO-OPS Web site: <http://tidesandcurrents.noaa.gov/>

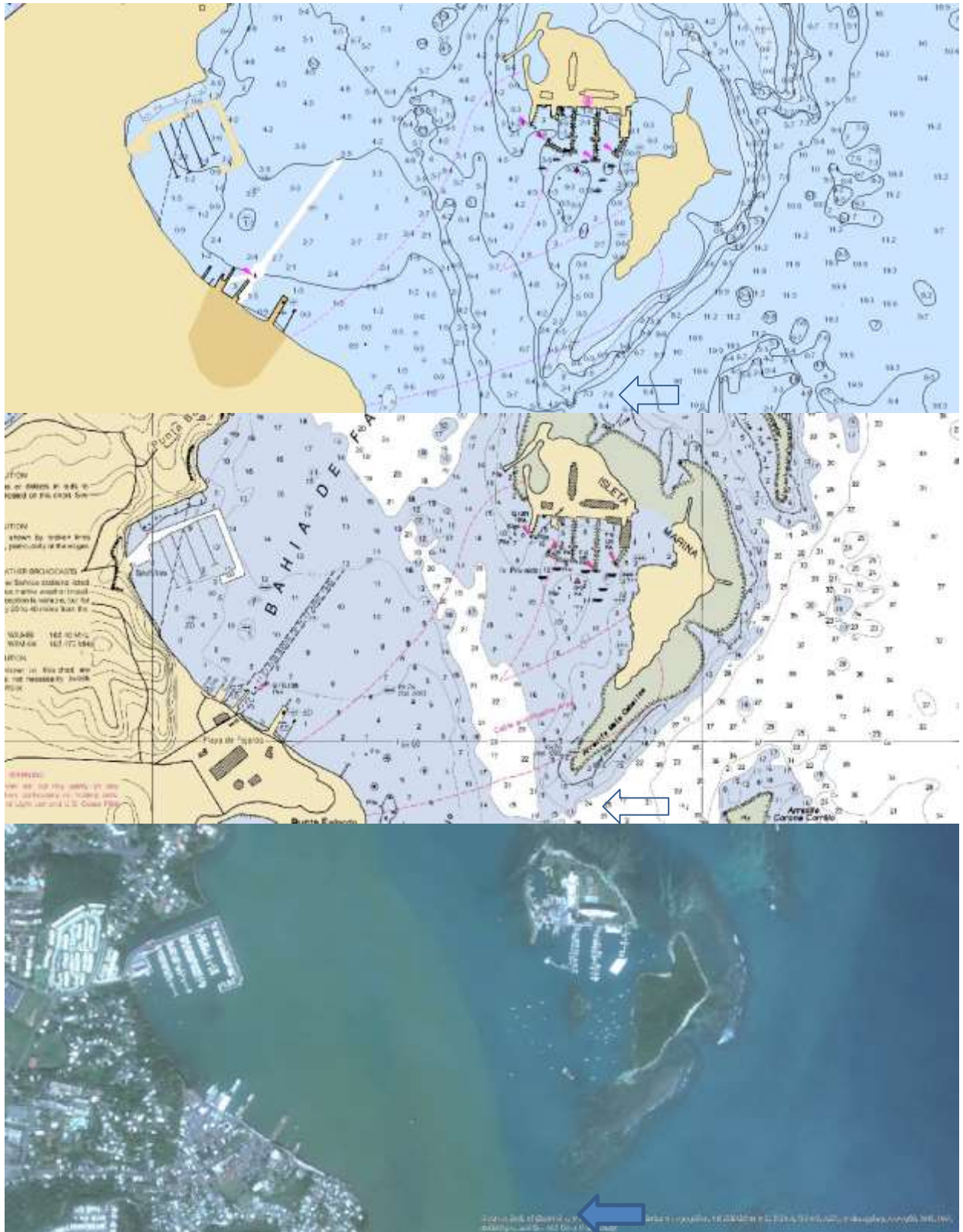


Figura 1. Puerto de Fajardo.



Figura 2. Trayecto del pulso de presión atmosférica desde el veril de la plataforma hasta llegar al Puerto de Fajardo. Abarca una distancia de 50.8 km con una dirección de 115° T relativo al Puerto de Fajardo.

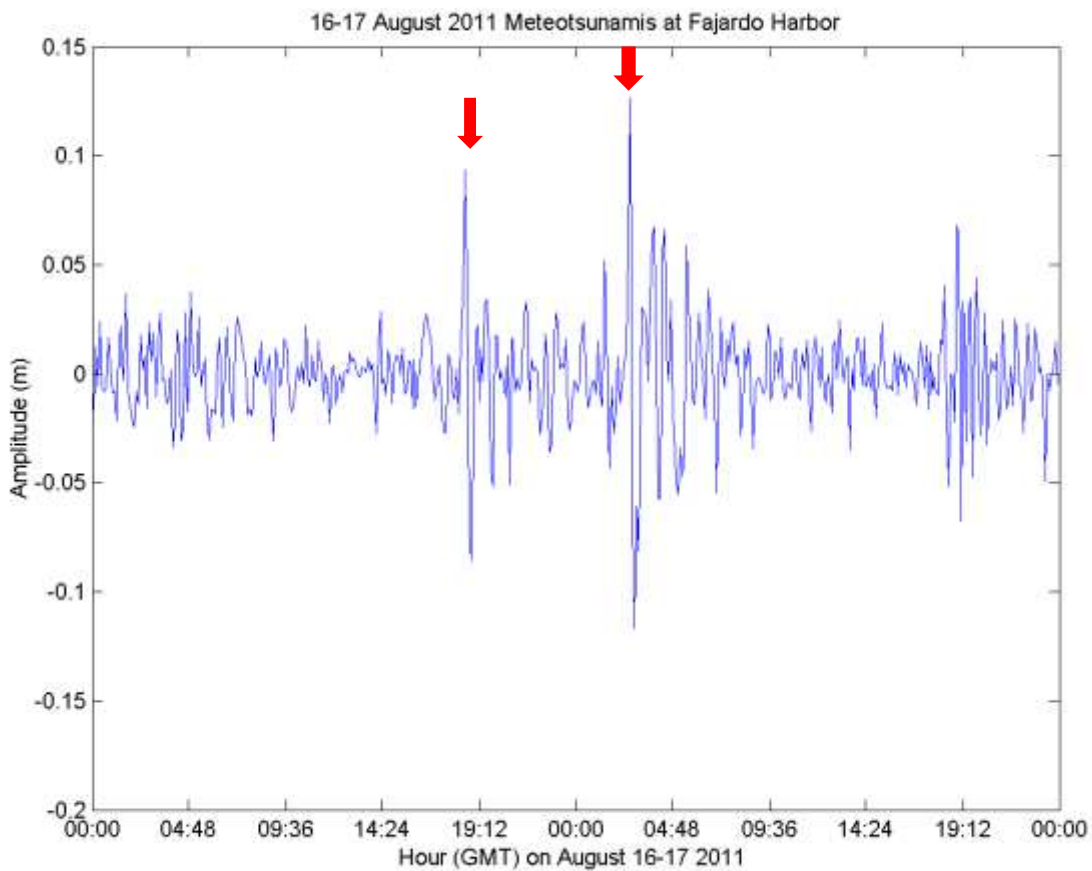


Figura 3. Dos meteotsunamis en el Puerto de Fajardo (Flecha roja). Ocurrieron los días 16-AGO-2011 18:30 GMT y el 17-AGO-2011 02:42 GMT. Unas 8.2 horas separan a ambos eventos.

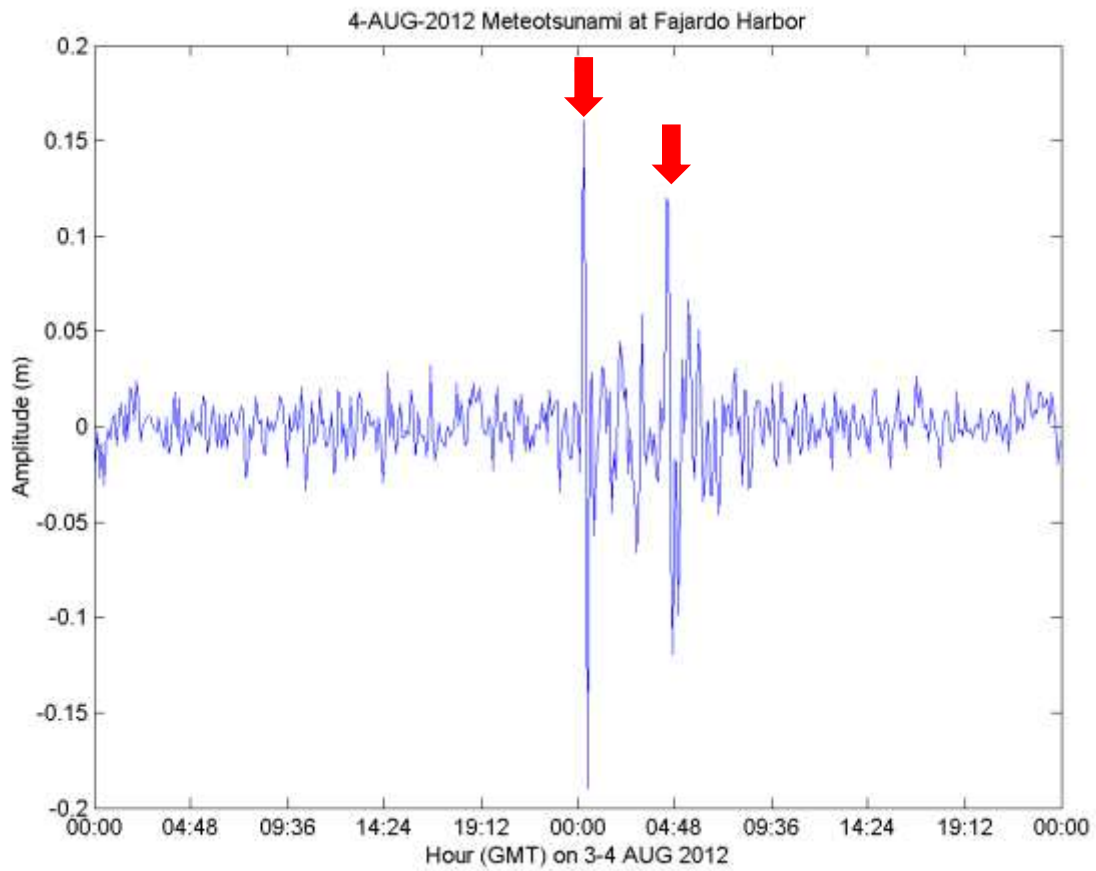


Figura 4. Dos meteotsunamis en el Puerto de Fajardo (Flecha roja). Ocurrieron los días 4-AGO-2012 00:18 GMT y el 4-AGO-2012 04:24 GMT. Unas 4.1 horas separan ambos eventos.



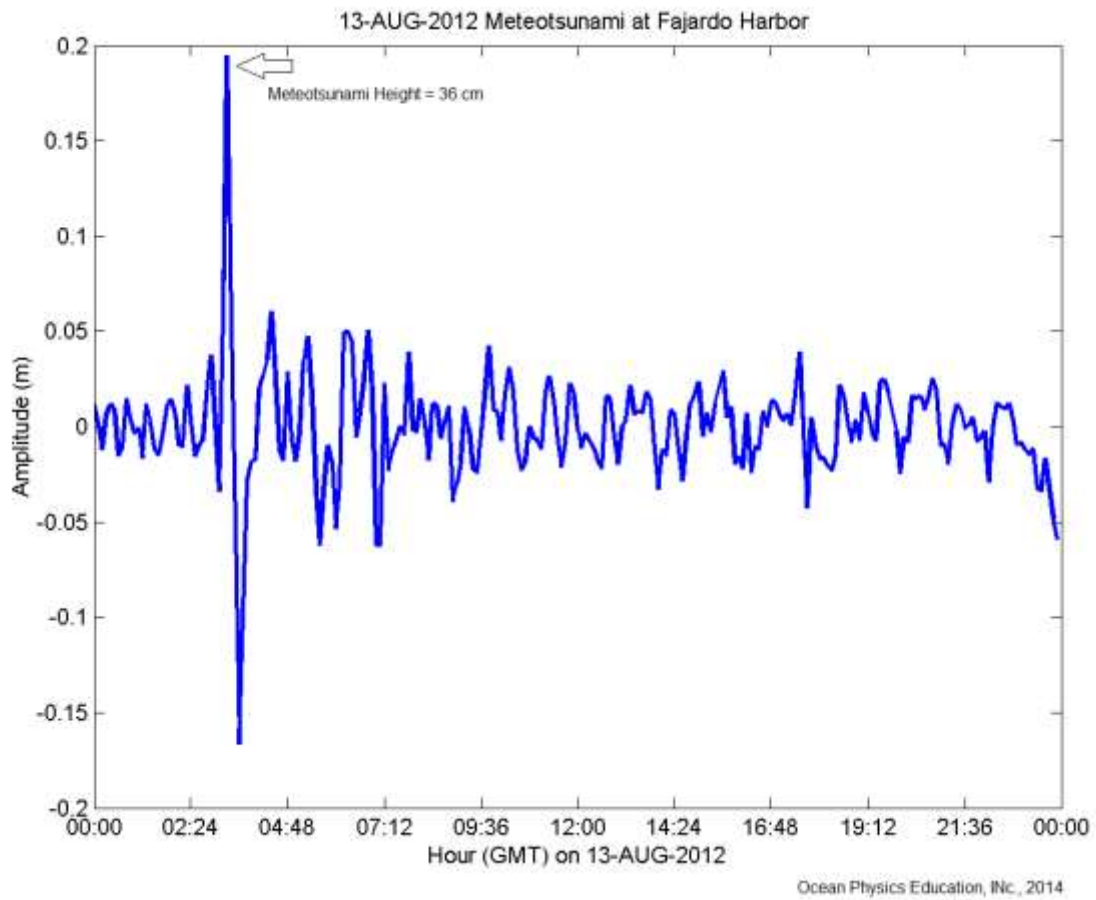


Figura 5. Meteotsunami en el Puerto de Fajardo ocurrió el día 13-AGO-2012 3:18 GMT (Flecha).

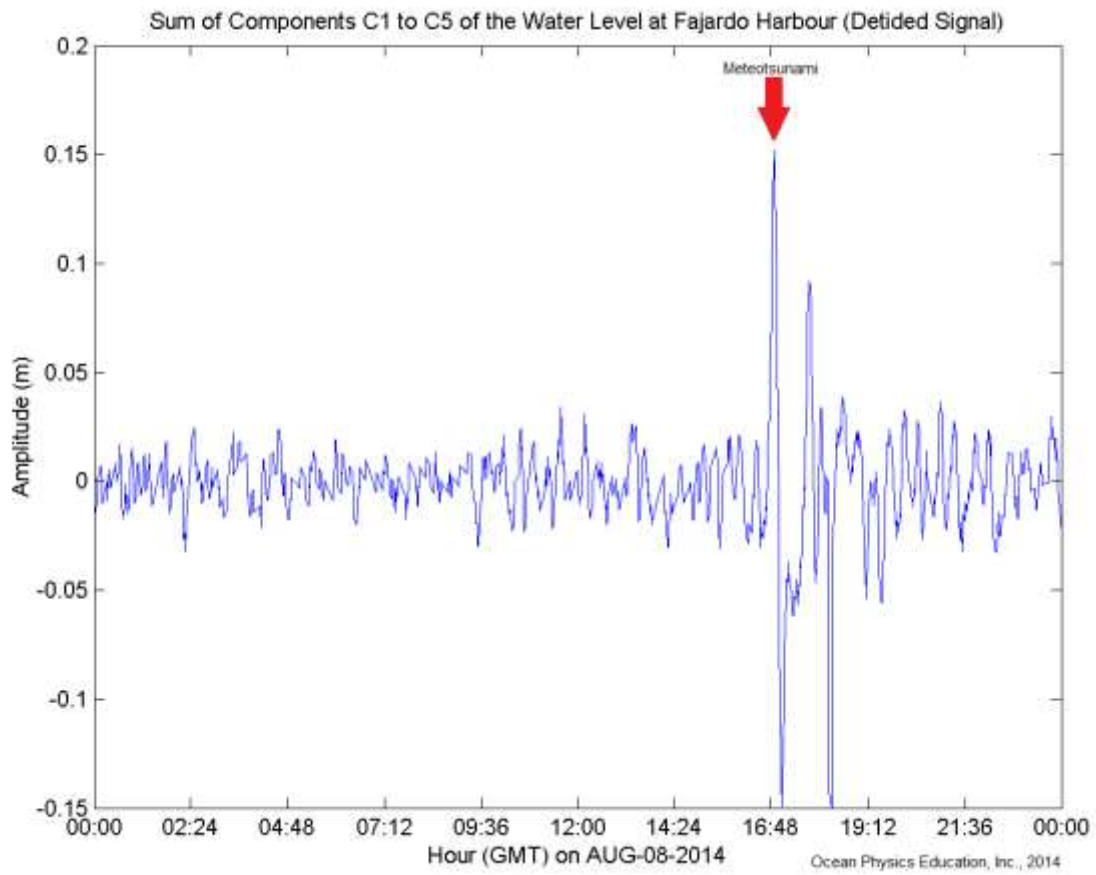


Figura 6. Meteotsunami en el Puerto de Fajardo el 8-AGO-2014 a las 16:53 GMT (Flecha Roja).