

ACERCA DE LA FÍSICA Y DE LA EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALERTA DE TERREMOTOS Y TSUNAMIS

Georgia Cua, Ph. D.¹

El terremoto del 26 de diciembre de 2004 de magnitud Mw 9.0 que se produjo en Sumatra fue el cuarto terremoto más grande registrado en el mundo desde 1900. El terremoto liberó tanta energía de deformación como todos los terremotos de los últimos 15 años juntos, y ocasionó grandes y abruptos movimientos del lecho marino en sentido vertical (del orden de 20 metros en algunos lugares), que generaron un mega tsunami que viajó a lo largo del Océano Índico. El terremoto y el tsunami juntos causaron más de 280,000 víctimas a lo largo de 10 países en el sur de Asia y en el este de África. La magnitud de este evento, como fenómeno físico y en términos de víctimas y pérdidas económicas, ha ocasionado un interés renovado y atención hacia los sistemas de alerta de terremotos y tsunamis. Es por lo tanto muy oportuno analizar la física y el criterio de evaluación de dichos sistemas de alerta.

El objetivo de la alerta de terremotos y tsunamis es proveer alguna información (altura de las olas previstas y tiempo de llegada) antes del comienzo de los movimientos del suelo de terremotos destructivos o de las olas del tsunami en un lugar particular. Dichos sistemas de alerta son posibles, en teoría, debido a la diferencia en tiempos de viaje entre la información, que viaja casi a la velocidad de la luz (300,000 km/s), y los trenes de olas que transportan la energía. Durante los terremotos, los movimientos destructivos del suelo son causados por las ondas S, las cuales son perturbaciones que producen deformaciones de corte que viajan a través de la tierra sólida a una velocidad de alrededor de 3.5 km/s. Los trenes de olas del tsunami viajan entre 200 y 500 m/s en alta mar. Un sistema de alerta temprana de terremoto necesita una red sismológica relativamente densa (con comunicaciones en tiempo real entre las estaciones de sismos y una instalación central de procesamiento) que monitoree continuamente la actividad sísmica en una determinada región. Una vez que comienza la ruptura causada por el terremoto, las primeras llegadas a las estaciones más cercanas al epicentro y las amplitudes iniciales de los movimientos del suelo debido a las ondas P, que viajan más rápido que las S, se usan para calcular la magnitud y la localización del terremoto antes del comienzo de los máximos movimientos del suelo. Las relaciones de atenuación, las cuales son expresiones matemáticas que describen la dependencia del pico máximo de las amplitudes del movimiento del suelo como una función de la magnitud del terremoto y de la distancia desde la falla, pueden ser luego utilizadas para predecir las amplitudes esperadas del movimiento de suelo en regiones más alejadas del epicentro del terremoto. Las boyas de alta mar y los mareógrafos ("tide gauges") desplegados a lo largo de las costas ofrecen información relacionada a la formación de un tsunami. Sin embargo, el gasto y la logística compleja que implican los despliegues de boyas en alta mar, y la reducción en el tiempo disponible de alerta al depender solamente de sensores de mareas hacen que, en la práctica, las alertas de tsunamis sean generalmente emitidas cuando los terremotos exceden una cierta magnitud ($M = 6.5$ en la región monitorizada por el Centro de Alertas de Tsunamis del Pacífico) y cuando los sismos tienen potencial para causar grandes desplazamientos verticales del lecho marino en regiones históricamente propensas a tsunamis.

Como las ondas S viajan más rápido que las del tsunami, los tiempos de alerta disponibles para una alerta temprana de terremotos son más cortos (del orden de segundos a decenas de segundos) que los tiempos posibles para una alerta de tsunami (del orden de minutos a horas). Algunas de las aplicaciones de las alertas tempranas de terremotos son: minimizar el alcance de los daños a los sistemas de comunicación, prevenir derrames peligrosos en instalaciones industriales, colocar las plantas nucleares en modo seguro, interrumpir operaciones delicadas de fabricación y procedimientos médicos, y detener diferentes sistemas de transportes. El uso de la información de alerta temprana de terremotos en un sistema de control activo de estructuras es un área de investigación aún en vías de desarrollo, pero que tiene un obvio potencial de minimizar las muertes y los daños estructurales. Por otro lado, el uso predominante de la alerta de tsunamis se enfocó en evacuar las comunidades costeras hacia tierras más altas.

En los casos de alertas de terremotos como así también de tsunamis, las preguntas relacionadas con la caracterización de la fuente, tales como dónde y cuán grande es el terremoto, y si el terremoto puede o va a provocar un tsunami potencialmente destructivo, son generalmente manejadas por sismólogos u otros científicos de las Ciencias de la Tierra. Para poder aumentar al máximo el tiempo disponible de alerta, para propósito de prevención la caracterización de

¹ Investigadora Asistente, Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. E-mail: gcua@uprm.edu

las fuentes de terremotos y tsunamis generalmente se basa en una cantidad mucho más limitada de información analizada con algoritmos relativamente simples y rápidos, comparado con la caracterización de las fuentes para propósitos de catalogación. La información usada para el primer caso consiste en las primeras llegadas de las ondas P a las estaciones más cercanas y sus amplitudes en los primeros pocos segundos, mientras que para el segundo objetivo generalmente se efectúan inversiones complejas de las formas de onda a partir de la ruptura completa causada por el terremoto registrado en numerosas estaciones. Lo anterior resulta en considerables incertidumbres en la información de alerta temprana, lo que a su vez significa que las falsas alarmas sean inevitables. A primera vista, parecería conveniente minimizar las falsas alarmas. Éstas tienen costos significativos, no sólo debido a la interrupción de la productividad y los efectos psicológicos que puedan llegar a tener en la gente; sino también debido al síndrome del “Pastorcito Mentiroso” – demasiadas falsas alarmas van a reducir el impacto y la efectividad de alertas precisas. Cómo utilizar la información de alerta temprana en el contexto de aplicaciones para mitigar daños teniendo en cuenta explícitamente las incertidumbres inherentes en la información de alerta, no es un problema trivial. La necesidad de responder a este interrogante traslada los sistemas de alerta desde los campos de la investigación científica a aquellos de la ingeniería y de la política pública.

En la actualidad, los únicos centros de alerta de tsunamis en el mundo son los Centros de Alerta de Tsunami en el Pacífico y en Alaska, los cuales emiten alertas sólo a las regiones alrededor del Océano Pacífico. En el sur de California, una de regiones mejores estudiadas en el mundo en términos de sismología, los esfuerzos de implementación de alerta temprana de tsunamis solamente han tomado ímpetu como resultado de las repercusiones del terremoto de Sumatra del 2004. La mayoría de los países propensos a terremotos y tsunamis siguen todavía vulnerables a estos eventos inevitables. Japón es tal vez el país mejor preparado para ellos. Por ejemplo: 1) el sistema “Uredas” de alerta temprana de terremotos ha sido utilizado exitosamente para detener trenes de gran velocidad (“shinkansen”) cuando las aceleraciones del suelo exceden cierto nivel; 2) la Agencia Meteorológica del Japón transmite al público a través del sistema “NowCast” los tiempos esperados de arribo de las máximas intensidades de temblores durante terremotos fuertes; 3) Japón está dentro de la región de vigilancia del Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico.

Como resultado de las repercusiones del gran terremoto de Sumatra, ha habido un elevado nivel de interés por los sistemas de alerta de tsunamis, y tanto los ingenieros como los funcionarios encargados de la política pública van a tener un rol muy importante al evaluar la viabilidad y los beneficios versus costos de dichos sistemas. Al llevar a cabo dichos análisis de beneficios versus costos, puede haber una tendencia a considerar solamente los eventos del tipo de los encontrados en los registros históricos, o a evaluar la viabilidad y los beneficios versus costos sobre períodos de tiempo del orden de decenas de años, o a asignarle mucha importancia al funcionamiento del sistema durante los eventos más probables, o también a penalizar seriamente el tema de las falsas alarmas. Sin embargo, es esencial que dichos análisis no se limiten a qué terremotos y tsunamis se sintieron y observaron, sino que deberían extenderse a qué tipos de eventos son posibles. Llevar a cabo esto de manera apropiada requiere establecer un diálogo abierto y colaboración entre sismólogos, geólogos, ingenieros y los funcionarios responsables de la política pública. A estos efectos, los siguientes puntos deberían ser tenidos en cuenta: los registros históricos son extremadamente cortos en relación con las escalas de tiempo geológico y muy probablemente no abarquen los posibles eventos más destructivos en una determinada región; la frecuencia de los terremotos está regulada por la ley de Gutenberg-Richter, la cual afirma que los eventos más probables seguramente son pequeños, con eventos verdaderamente devastadores que tienen períodos de recurrencia del orden de miles de años; y finalmente, el incremento de una unidad en la magnitud del terremoto corresponde a un incremento de 32 veces en la energía liberada por el mismo. Por eso, los sistemas de alerta de terremotos y tsunamis puede que no tengan una razón beneficio versus costos favorable en períodos de 10, 50, ó 100 años, debido a la ausencia de grandes eventos o al costo de las falsas alarmas. Sin embargo, los beneficios asociados con los sistemas de alerta de terremotos y tsunamis durante los eventos menos frecuentes pero destructivos, tal como el terremoto de Sumatra del 2004, muy probablemente pueden compensar por el funcionamiento no óptimo durante eventos más pequeños y más frecuentes. Desde el punto de vista de las víctimas y de la devastación sembrada en Sumatra y en otros países del Océano Índico, las falsas alarmas son simples inconvenientes que pueden ser tolerados, y los millones de dólares necesarios para la investigación y para establecer la infraestructura para implementar los sistemas de alerta de terremotos y tsunamis son simplemente gotas de agua en el océano.