

RIESGO DE TSUNAMI EN ECUADOR

Manuel Contreras López^{1,*}

Resumen

El litoral continental de Ecuador se encuentra cercano a la subducción de la placa de Nazca con la sudamericana y corresponde a una de las zonas más sísmicas del planeta. De 58 tsunamis que han arribado al litoral ecuatoriano, el 19% resultó ser destructivo. En este trabajo se cuantifica el riesgo estimando probabilidades de acuerdo con la fuente de generación. En el litoral continental, el 50% de los tsunamis destructivos son de campo cercano, el 25% de campo intermedio y el 25% de campo lejano. En las islas Galápagos, el 75% de los tsunamis destructivos son de campo lejano, el 25% de campo cercano y ninguno de campo intermedio. Un tsunami de campo cercano tiene tres veces más probabilidad de ser destructivo en el litoral continental que uno de campo intermedio o lejano. En Galápagos, la probabilidad que un tsunami sea destructivo es independiente de la fuente de generación. Si un tsunami de fuente lejana es destructivo en Galápagos, existe un 28% de posibilidades que sea destructivo en el litoral continental. Si un tsunami de campo cercano resulta destructivo en el litoral continental, entonces es muy probable que también lo sea en el archipiélago.

Palabras clave: Islas Galápagos, maremotos en el Pacífico sur oriental, evaluación de riesgos naturales en zonas costeras.

Abstract

The continental coast of Ecuador is close to the subduction of the Nazca plate and the South American and corresponds to one of the most seismic areas in the world. Of 58 tsunamis that have arrived in the Ecuadorian coast, 19% turned out to be destructive. In this paper the risk estimating probabilities according to the source of generation is quantified. In the continental coastline, 50% of destructive tsunamis are near-field, 25% intermediate and 25% field far field. In the Galapagos Islands, 75% of destructive tsunamis are far-field, 25% of near-field and 0% intermediate-field. A near-field tsunami has three times more likely to be destructive in the continental coastline one intermediate and far field. In Galapagos, the probability that a destructive tsunami is independent of the source of generation. If a distant source tsunami is destructive Galapagos, there is a 28% chance to be destructive in the continental coast. If a near-field tsunami is destructive in the continental coast, then it is very likely to also be in the archipelago.

Keywords: Galapagos Islands, tsunamis in the eastern South Pacific, Assessment of Natural Hazards in Coastal Zones.

^{1,*}Magíster en Estadística, Ingeniero Informático, Matemático. Investigador Centro de Estudios Avanzados y Decano Facultad de Ingeniería de la Universidad de Playa Ancha - Chile.
Autor para correspondencia ✉: manuel.contreras@upla.cl

Recibido: 11-08-2014, Aprobado tras revisión: 23-10-2014

Forma sugerida de citación: Contreras-López, M. (2014). "Riesgo de Tsunami en Ecuador". INGENIUS. N.º12, (Julio-Diciembre). pp. 68-75. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

El litoral de Ecuador se encuentra a unos cincuenta kilómetros de la zona de convergencia de las placas sudamericana y Nazca, constituyéndose esta interacción en la fuente sismogénica más activa e importante del país y forma parte de uno de los segmentos de la zona de subducción sudamericana [1], que se extiende por más de 9000 km en paralelo del litoral del Pacífico sur oriental, las costas de Colombia, Ecuador, Perú y Chile. Esta zona es una de las más sísmicas del planeta y representa alrededor del 15% al 20% de la energía telúrica total liberada por la Tierra [2]. La cordillera de los Andes es el resultado de este choque de placas, como también los alzamientos costeros en múltiples puntos del litoral del Pacífico sur oriental [3]. En esta zona de subducción ocurren sismos con magnitudes importantes y cuyos epicentros están muy cerca de la línea de costa o sobre el lecho marino próximo al continente, condiciones suficientes para generar un tsunami de campo cercano o una onda en la columna de agua de origen sísmico.

La costa continental de Ecuador tiene una longitud que supera los 1000 km [4], desde la desembocadura del estuario Mataje por el norte en la frontera con Colombia, hasta la boca de Capones por el sur en la frontera con Perú [3]. Desde 1906 a la fecha se reconocen en la literatura seis tsunamis de origen cercano a la costa continental de Ecuador [5], cuatro de ellos destructivos, destacándose el evento de 1906 que devastó el norte de la provincia de Esmeraldas [6] y es uno de los diez terremotos con mayor magnitud registrada, $M_w = 8.8$, idéntica magnitud del terremoto sufrido por Chile en el año 2010. Recientemente Contreras-López [7], en una revisión sobre la cronología de tsunamis ocurridos en Ecuador desde 1586 al año 2012, pudo identificar 58 tsunamis, de los cuales 24,1% resultaron ser de campo cercano y 10 fueron destructivos algunos de estos últimos resultaron ser de campo lejano.

Por otra parte, se debe considerar que Ecuador, y en especial las islas Galápagos, se encuentran expuestos a tsunamis generados en otros lugares del mundo (por ejemplo: Japón, Alaska, EE. UU., México, Centroamérica, Chile, Nueva Zelanda). Tal como fue graficado con el tsunami de Japón 2011, que motivó una evacuación de las costas ecuatorianas [8]. Estos tsunamis se denominan de campo lejano.

El conocimiento detallado de estadísticas de tsunamis que han afectado las costas de Ecuador, es una labor prioritaria para cualquier estudio de riesgo costero. Sin embargo, se debe considerar que existe información en la zona solo a partir del año 1586. Por otra parte, debido a la reciente y gradual localización de asentamientos humanos del sector costero del país [6]-[9], existe una importante probabilidad que en el pasado eventos locales hayan afectado lugares no

habitados y, por lo tanto, no existen registros de sus consecuencias.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el riesgo de tsunami, tanto de campo cercano como lejano, en las costas ecuatorianas y el Archipiélago de Galápagos a partir de la información histórica conocida en el período 1586-2012. El riesgo es calculado mediante probabilidades de ocurrencia.

A partir de una revisión bibliográfica sobre las lecciones aprendidas de los tsunamis de Chile 1960, Sumatra 2004, Chile 2010 y Japón 2011, se reúnen una serie de recomendaciones para minimizar el riesgo, alejando las vulnerabilidades de la amenaza.

2. Materiales y métodos

La base de datos de los 58 tsunamis que afectaron Ecuador entre 1586 y 2012 [7], y presentada en detalle en [10], es utilizada para estimar probabilidades por frecuencia de diversos sucesos que permitan caracterizar el riesgo de tsunami en el litoral de Ecuador continental e insular (Archipiélago de Galápagos) en futuros eventos.

Para organizar la información, se construyó una tabla (Tabla 1), con la fecha, magnitud de momento sísmico y país donde se localizó el terremoto que originó el tsunami; el tipo de campo de acuerdo con su origen (cercano, intermedio, lejano), el runup en metros registrado en Ecuador continental e insular (Archipiélago de Galápagos).

Se definieron sucesos en el espacio de probabilidades Ω consistente de todos los tsunamis que han afectado el litoral continental y/o insular de Ecuador. Los sucesos considerados contemplan el origen, el registro y si fueron destructivos o no. El origen del tsunami se divide en:

- C = Tsunamis de campo cercano: la zona de generación es adyacente a la costa ecuatoriana, o se encuentra cercano a las fronteras con Colombia o Perú (entre los 4° N, Buenaventura en Colombia y los 5° S, Piura en Perú).
- I = Tsunamis de campo intermedio: Si el punto de origen se encuentra a una distancia menor a 1000 km de la costa ecuatoriana (entre 8° N, Panamá y 9° S, Chimbote en Perú) y no es de campo cercano.
- L = Tsunamis de campo lejano: si el tsunami es transoceánico (de origen remoto).

El concepto de campo intermedio no es reconocido usualmente en la literatura, pero debido a la gran proporción de sucesos ocurridos a una distancia menor a los 1000 km, pero que no ocurren frente a las costas

Tabla 1. Base de datos Tsunamis que arribaron a Ecuador entre 1586 y 2012. RU-C es el *Run-Up* registrado en el litoral continental. Ru-G es el *Run-Up* registrado en Galápagos.

N	Fecha	Mw	País	Campo	RU-C	RU-G
1	1586/07/10	8,5	Perú	I	SD	SD
2	1678/06/18	8,2	Perú	I	SD	SD
3	1746/10/29	8,6	Perú	I	SD	SD
4	1806/12/01	7,5	Perú	I	SD	SD
5	1808/11/30	SD	Ecuador	C	SD	SD
6	1827/11/16	7,0	Ecuador	C	SD	SD
7	1847/05/23	SD	Perú	I	SD	SD
8	1860/04/23	SD	Perú	I	>2	SD
9	1865/01/08	SD	Perú	I	SD	SD
10	1868/08/13	9,1	Chile	I	4	SD
11	1868/08/18	7,7	Ecuador	C	SD	SD
12	1877/05/10	8,3	Chile	L	SD	SD
13	1877/05/14	SD	Perú	I	SD	SD
14	1877/10/11	SD	Colombia	C	SD	SD
15	1878/01/27	SD	Perú	L	SD	SD
16	1882/09/07	7,9	Panamá	I	SD	SD
17	31/01/1906	8,8	Ecuador	C	5	SD
18	07/02/1906	6,3	Ecuador	C	SD	SD
19	12/01/1914	SD	Perú	I	SD	SD
20	02/10/1933	6,9	Ecuador	C	2,5	2,0
21	22/05/1942	7,0	Colombia	C	SD	SD
22	04/03/1952	8,1	Japón	L	0,1	SD
23	04/11/1952	9,0	Rusia	L	1,89	SD
24	15/02/1953	5,5	Perú	I	SD	SD
25	12/12/1953	7,4	Perú	C	0,2	SD
26	09/03/1957	8,7	Alaska	L	0,53	SD
27	19/01/1958	7,7	Colombia	C	5,9	SD
28	07/02/1959	7,4	Perú	C	SD	SD
29	22/05/1960	9,5	Chile	L	1,9	0,6
30	20/11/1960	6,8	Perú	I	SD	SD
31	12/03/1962	6,8	Costa Rica	I	SD	0,1
32	28/03/1964	9,2	Alaska	L	0,6	1,0
33	04/02/1965	8,7	Alaska	L	0,2	SD
34	17/10/1966	8,1	Perú	I	SD	0,2
35	28/12/1966	7,8	Chile	L	SD	0,1
36	03/09/1967	7,0	Perú	I	SD	SD
37	11/08/1969	8,2	Rusia	L	0,3	0,2
38	31/05/1970	7,9	Perú	I	SD	SD
39	03/10/1974	8,1	Perú	I	SD	SD
40	12/12/1979	8,1	Colombia	C	>2	SD
41	03/03/1985	8,0	Chile	L	0,2	SD
42	19/09/1985	8,0	México	I	0,3	0,11
43	07/05/1986	8,0	Alaska	L	0,07	0,02
44	02/09/1992	7,7	Nicaragua	I	0,1	0,55
45	09/10/1995	8,0	México	I	SD	0,1
46	21/02/1996	7,5	Perú	C	SD	0,2
47	25/02/1996	7,1	México	I	SD	0,06
48	10/06/1996	7,9	Alaska	L	SD	0,04
49	04/08/1998	7,2	Ecuador	C	SD	SD
50	23/06/2001	8,4	Perú	I	SD	0,9
51	26/12/2004	9,1	Sumatra	L	SD	0,14
52	15/11/2006	8,3	Rusia	L	SD	0,33
53	15/08/2007	8,0	Perú	I	SD	0,54
54	19/03/2009	7,6	Islas Tonga	L	0,06	0,14
55	29/09/2009	8,0	Islas Samoa	L	SD	0,13
56	27/02/2010	8,8	Chile	L	SD	1,08
57	11/03/2011	9,0	Japón	L	SD	>2
58	06/07/2011	7,6	N. Zelanda	L	SD	0,15

ecuatorianas continentales, fue necesario incorporarlo. Se debe observar que C, I y L forman una partición de Ω . Es decir:

$$\Omega = C \cup I \cup L \quad (1)$$

y: $C \cap I = \emptyset$, $C \cap L = \emptyset$, $I \cap L = \emptyset$ y $C \cap I \cap L = \emptyset$, \emptyset es el conjunto vacío.

Con respecto a la detección o registro de los tsunamis, se consideraron los sucesos:

- LC = Tsunami registrado en el litoral continental de Ecuador (destructivos o no).

- G = Tsunami registrado en el litoral del Archipiélago de Galápagos (destructivos o no).

Se tiene:

$$\Omega = LC \cup G \quad (2)$$

En este caso no se forma una partición, pues aunque Ω se forma con la unión de los sucesos LC y G, un tsunami puede ser registrado tanto en el litoral continental como en Galápagos: $LC \cap G \neq \emptyset$.

Por último, considerando el carácter destructivo de los tsunamis, se pueden definir los tres sucesos:

- D = Tsunamis destructivos en el litoral de Ecuador (insular o continental).
- D_{LC} = Tsunami destructivo en el litoral continental.
- D_G = Tsunami destructivo en Galápagos.

Los tsunamis destructivos (D), pueden ser destructivos en el litoral continental o en el Archipiélago de Galápagos (ecuación 3).

$$D = D_{LC} \cup D_G \quad (3)$$

Pero se debe tener en cuenta que $D_{LC} \cap D_G \neq \emptyset$, es decir, existen tsunamis que son destructivos tanto en Galápagos como en el litoral continental.

Se debe observar que todos los tsunamis destructivos en el litoral continental o en el archipiélago de Galápagos, resultan ser registrados, es decir: $D_{LC} \subseteq LC$ y $D_G \subseteq G$.

3. Resultados

En una primera aproximación se asume que los 58 tsunamis registrados en la Tabla 1 sirven para definir probabilidades por frecuencia para los sucesos considerados en el espacio de probabilidades Ω . Se tiene: $IP(D) = 0,19$, $IP(C) = 0,24$, $IP(I) = 0,41$ y $IP(L) = 0,35$.

Al calcular las probabilidades condicionales, por ejemplo que el tsunami sea destructivo en el Archipiélago de Galápagos, dado que se sabe fue destructivo, se tienen estimaciones que un tercio de los tsunamis resultan ser destructivos en Galápagos (ecuación 4).

$$IP(D_G/D) = \frac{IP(D_G \cap D)}{IP(D)} = \frac{IP(D_G)}{IP(D)} = 0,36 \quad (4)$$

A partir de la ecuación 4 se puede estimar la probabilidad que un tsunami sea destructivo en Galápagos, $IP(DG)$ mostrado en la ecuación 5.

$$IP(DG) = IP(D) \times IP(D_G/D) = 0,07 \quad (5)$$

Un cálculo similar permite estimar la probabilidad condicional de un tsunami destructivo en el litoral continental de Ecuador, sabiendo que el tsunami es destructivo (ecuación 6).

$$IP(D_{LC}/D) = \frac{IP(D_{LC} \cap D)}{IP(D)} = \frac{IP(D_{LC})}{IP(D)} = 0,72 \quad (6)$$

Análogamente, la ecuación 6 permite estimar la probabilidad que un tsunami sea destructivo en el litoral continental, como se muestra en la ecuación 7.

$$IP(D_{LC}) = IP(D) \times IP(D_{LC}/D) = 0,14 \quad (7)$$

De esta forma, la probabilidad que un tsunami sea destructivo en el litoral continental (ecuación 7), duplica la probabilidad que sea destructivo en Galápagos (ecuación 5). Si los sucesos destructivos son independientes entre el litoral continental y Galápagos, se debería verificar que $IP(D_G \cap D_{LC}) = IP(D_G)IP(D_{LC})$. De las ecuaciones 5 y 7 se sabe que:

$$IP(D_G) \times IP(D_{LC}) = 0,07 \times 0,14 = 0,01 \quad (8)$$

Por otro lado, se tiene que: $IP(D) = IP(D_G \cup D_{LC}) = IP(D_G) + IP(D_{LC}) - IP(D_G \cap D_{LC})$. Despejando la probabilidad de la intersección entre los sucesos destructivos en Galápagos y el litoral continental, se tiene: $IP(D_G \cap D_{LC}) = IP(D_G) + IP(D_{LC}) - IP(D)$. Usando la ecuación 3 se obtiene la siguiente ecuación 9 para la probabilidad conjunta:

$$IP(D_G \cap D_{LC}) = IP(D_G) + IP(D_{LC}) - IP(D) \quad (9)$$

Usando las ecuaciones 5 y 7, se pueden reemplazar $IP(D_G)$ y $IP(D_{LC})$ en la ecuación 9, lo que permite realizar los cálculos de la ecuación 10.

$$\begin{aligned} IP(D_{LC} \cap D_G) &= IP(D)IP(D_{LC}/D) + \dots \\ &\dots + IP(D)IP(D_G/D) - IP(D) = \\ &= IP(D) [IP(D_{LC}/D) + IP(D_G/D) - 1] = 0,02 \end{aligned} \quad (10)$$

Por lo tanto, D_G y D_{LC} no son independientes (pues la probabilidad conjunta es el doble que el producto de las probabilidades de que el suceso sea destructivo en Galápagos y el litoral continental).

La probabilidad conjunta nos permite calcular la probabilidad que el suceso sea destructivo simultáneamente en el litoral continental y Galápagos, sabiendo que fue destructivo, lo que se tiene en la ecuación 11:

$$IP(D_{LC} \cap D_G/D) = \frac{IP(D_{LC} \cap D_G \cap D)}{IP(D)}$$

$$= \frac{IP(D_{LC} \cap D_G)}{IP(D)} = 0,11 \quad (11)$$

La definición de la probabilidad condicional, permite utilizar la ecuación 10 para estimar la probabilidad que el suceso sea destructivo en el litoral continental, dado que fue destructivo en Galápagos (ecuación 12) y que el suceso sea destructivo en Galápagos, dado que lo fue en el litoral continental (ecuación 13).

$$IP(D_{LC}/D_G) = \frac{IP(D_{LC} \cap D_G)}{IP(D_G)} \quad (12)$$

$$IP(D_G/D_{LC}) = \frac{IP(D_G \cap D_{LC})}{IP(D_{LC})} \quad (13)$$

La Tabla 1 permite estimar las probabilidades condicionales que los tsunamis sean de campo cercano, intermedio o lejano, dado que fueron destructivos en el litoral continental de Ecuador.

$$\begin{aligned} IP(C/D_{LC}) &= 0,5; IP(I/D_{LC}) = IP(L/D_{LC}) = 0,25 \\ \Rightarrow IP(C^c/D_{LC}) &= 0,50 \text{ y } IP(C^c/D_{LC}) = 0,50 \end{aligned} \quad (14)$$

Por álgebra de probabilidades (probabilidad del complemento de un suceso), se tiene que la probabilidad que un suceso sea de campo cercano o no lo sea, dado que fue destructivo en el litoral continental, tiene la misma probabilidad simétrica (ecuación 14).

Cálculos análogos para el caso de sucesos destructivos en Galápagos son mostrados en la ecuación 15. En este caso, si existe una diferencia entre sucesos de campo cercano y que no lo sean: es más probable que un tsunami no sea de campo cercano si se sabe que fue destructivo.

$$\begin{aligned} IP(C/D_G) &= 0,25; IP(I/D_G) = 0, IP(L/D_G) = 0,75 \\ \Rightarrow IP(C/D_G) &= 0,25 \text{ y } IP(C^c/D_G) = 0,75 \end{aligned} \quad (15)$$

Es decir, no hay registros de tsunamis destructivos en Galápagos, cuyo origen sea intermedio. Usando el teorema de Bayes se pueden estimar las probabilidades que un tsunami sea destructivo en el litoral continental, dado que sea de campo cercano (ecuación 16) o que sea destructivo dado que sea de campo intermedio o lejano (ecuación 17).

$$IP(D_{LC}/C) = \frac{IP(C/D_{LC})IP(D_{LC})}{IP(C)} = 0,29 \quad (16)$$

$$IP(D_{LC}/C^c) = \frac{IP(C^c/D_{LC})IP(D_{LC})}{IP(C^c)} = 0,09 \quad (17)$$

Esto significa que un tsunami destructivo en el litoral continental, se encuentra relacionado a la fuente: si la fuente es cercana hay tres veces mayor probabilidad que sea destructivo.

Al realizar los cálculos en el archipiélago de Galápagos, se tiene que la probabilidad que sea destructivo dado que es de campo cercano, es la misma que la probabilidad que sea destructivo dado que no sea de campo cercano (ecuaciones 18 y 19).

$$IP(D_G/C) = \frac{IP(C/D_G)IP(D_G)}{IP(C)} = 0,07 \quad (18)$$

$$IP(D_G/C^c) = \frac{IP(C^c/D_G)IP(D_G)}{IP(C^c)} = 0,07 \quad (19)$$

Es decir, que un tsunami sea destructivo en Galápagos es independiente de la fuente de generación. Esto permite calcular la probabilidad conjunta para que un tsunami sea destructivo en Galápagos y sea de campo cercano (ecuación 20).

$$IP(D_G \cap C) = IP(D_G)IP(C) = 0,02 \quad (20)$$

Con la probabilidad conjunta de la ecuación 20 y la definición de probabilidad condicional, se puede estimar la probabilidad que el tsunami sea destructivo en el litoral continental en Ecuador, dado que sea destructivo en el Archipiélago de Galápagos y que sea de campo lejano o intermedio.

$$IP(D_{LC}/D_G \cap C^c) = \frac{D_{LC} \cap D_G \cap C^c}{IP(D_G \cap C^c)} = 0,28 \quad (21)$$

Así, si un tsunami de fuente lejana es destructivo en Galápagos, existe un 28% de posibilidades que sea destructivo en el litoral continental (ecuación 21). En forma similar, se puede estimar la probabilidad que sea destructivo en Galápagos dado que fue destructivo en el litoral continental y de campo cercano. La ecuación 22 muestra que en esta situación, la probabilidad resulta ser 1 (aproximado al segundo decimal).

$$IP(D_G/D_{LC} \cap C) = \frac{IP(D_{LC} \cap D_G/C)IP(C)}{IP(D_G)IP(C)} = 1,00 \quad (22)$$

Luego, si un tsunami de campo cercano resulta destructivo en el litoral continental, entonces es casi seguro que será destructivo en el Archipiélago.

En la Tabla 2, se resumen las estimaciones de probabilidades logradas con la información de los 58 tsunamis registrados.

Tabla 2. Estimaciones de probabilidad asignados por frecuencias históricas y álgebra de probabilidades.

N	Notación	Descripción	Prob.
1	IP(D)	Tsunami destructivo	0,19
2	IP(C)	Tsunami de campo cercano	0,24
3	IP(I)	Tsunami de campo intermedio	0,41
4	IP(L)	Tsunami de campo lejano	0,35
5	IP(C _c)	Tsunami que no es de campo cercano	0,76
6	IP(D _G /D)	Tsunami destructivo en Galápagos, que se sabe es destructivo	0,36
7	IP(D _G)	Tsunami destructivo en Galápagos	0,07
8	IP(D _{LC} /D)	Tsunami destructivo en el litoral continental, que se sabe destructivo	0,72
9	IP(D _{LC})	Tsunami destructivo en el litoral continental	0,14
10	IP(D _G ∩ D _{LC})	Tsunami destructivo en el litoral continental y simultáneamente en Galápagos	0,02
11	IP(D _{LC} ∩ D _G /D)	Tsunami destructivo en el litoral continental y simultáneamente en Galápagos, que se sabe es destructivo	0,11
12	IP(D _{LC} /D _G)	Tsunami destructivo en el litoral continental, que fue destructivo en Galápagos	0,29
13	IP(D _G /D _{LC})	Tsunami destructivo en Galápagos, que fue destructivo en el litoral continental	0,14
14	IP(C/D _{LC})	Tsunami de campo cercano, que fue destructivo en el litoral continental	0,50
15	IP(I/D _{LC})	Tsunami de campo intermedio, que fue destructivo en el litoral continental	0,25
16	IP(L/D _{LC})	Tsunami de campo lejano, que fue destructivo en el litoral continental	0,25
17	IP(C _c /D _{LC})	Tsunami que no es de campo cercano, que fue destructivo en el litoral continental	0,50
18	IP(C/D _G)	Tsunami de campo cercano, que fue destructivo en Galápagos	0,25
19	IP(I/D _G)	Tsunami de campo intermedio, que fue destructivo en Galápagos	0,00
20	IP(L/D _G)	Tsunami de campo lejano, que fue destructivo en Galápagos	0,75
21	IP(C _c /D _G)	Tsunami que no es de campo cercano, que fue destructivo en Galápagos	0,75
22	IP(D _{LC} /C)	Tsunami destructivo en el litoral continental, que fue de campo cercano	0,29
23	IP(D _{LC} /C _c)	Tsunami destructivo en el litoral continental, que no fue de campo cercano	0,09
24	IP(D _G /C)	Tsunami destructivo en Galápagos, que fue de campo cercano	0,07
25	IP(D _G /C _c)	Tsunami destructivo en Galápagos, que no fue de campo cercano	0,07
26	IP(D _G ∩ C)	Tsunami destructivo en Galápagos y simultáneamente de campo cercano	0,02
27	IP(D _{LC} /D _G ∩ C _c)	Tsunami destructivo en el litoral continental, que fue destructivo en Galápagos y simultáneamente de campo lejano o intermedio	0,28
28	IP(D _G /D _{LC} ∩ C)	Tsunami destructivo en Galápagos, que fue destructivo en el litoral continental y de campo cercano	1,00

4. Discusión

Existe evidencia de la existencia de un silencio sísmico en el litoral continental ecuatoriano, entre el cabo San Lorenzo y la desembocadura del río Guayas [6], por lo que evaluar el riesgo de tsunamis de campo cercano en Ecuador es prioritario. Sin embargo, también tsunamis de campo lejano o intermedio pueden afectar las costas, tal como muestran los registros históricos.

La ecuación 12 es relevante pues la mayoría de los tsunamis que afectan a Ecuador son de campo lejano o intermedio y repercuten primero a Galápagos, por lo que si resultan ser destructivos en el Archipiélago, se sabe con anterioridad que existe un 29% de probabilidad que lo sea en el litoral continental.

La ecuación 15 muestra que no hay registros de tsunamis destructivos en Galápagos, cuyo origen sea intermedio. La ecuación 21 ilustra cómo puede ser usado el Archipiélago de Galápagos como centinela de tsunamis destructivos: Si un tsunami de fuente transoceánica resulta ser destructivo en Galápagos, existe un 28% de posibilidad que resulte también ser destructivo en el litoral continental.

Cómo Galápagos se encuentra a 972 km al oeste de la costa ecuatoriana [10], se cuenta con poco más de una hora para advertir de esta situación al continente. Recíprocamente, si un tsunami de campo cercano resulta ser destructivo en el litoral continental, entonces de acuerdo con la ecuación 22, se cuenta con preciosos minutos para advertir que con seguridad también será destructivo en el Archipiélago.

Para analizar el riesgo, por un lado se debe tener claridad del peligro existente, tanto de la generación de tsunamis de campo cercano como lejano (lo que se ha procurado establecer aquí con la información histórica disponible) y por otro evaluar la vulnerabilidad mediante la definición de variables geodemográficas adaptadas a cada localidad en particular.

Así, la evaluación del riesgo se realiza mediante el cruce de la información de vulnerabilidad de la localidad y el peligro de tsunami. Esto debiera ser incorporado en la planificación territorial de la zona costera analizada [11], y también permitir definir medidas de mitigación del daño orientadas a minimizar la pérdida de vidas y el daño de las obras marítimas y terrestres.

Existe escasa bibliografía específica sobre recomendaciones de diseño de obras marítimas y terrestres que contemplen los efectos de tsunamis. En general, la literatura es reciente y requiere de un análisis y contextualización al caso ecuatoriano [12], [13].

De acuerdo con lo establecido por Winckler et al. [11] como síntesis y conceptualización de diferentes autores y experiencias adquiridas en diversos desastres,

la planificación y diseño de infraestructura costera y portuaria podrían resumir en los siguientes puntos: a) evaluación del riesgo en zonas costeras, b) incorporación de criterios en instalaciones, c) localización de líneas de vida considerando el riesgo y d) implementación de planes de evacuación y educación de la población.

4.1. Evaluación del riesgo de tsunami en zonas costeras

Una de las medidas más eficientes para disminuir el riesgo de tsunami es la incorporación de este peligro en los instrumentos de planificación urbana [14], para evitar especialmente la instalación de hospitales, colegios, asilos de ancianos, servicios de seguridad y de respuesta a emergencias en sectores de alto riesgo de inundación. Existen varios trabajos orientados a evaluar los riesgos de tsunami en el litoral ecuatoriano [5], [15], [16], [17] y se han elaborado cartas de inundación para diversas localidades costeras, sin embargo, en varias de ellas se revela el inadecuado emplazamiento de escuelas y colegios, hospitales, municipios y otros servicios de respuestas ante emergencias [18].

4.2. Incorporación de criterios de tsunami en instalaciones costeras

Hoy en día existen 4 puertos comerciales, 6 terminales petroleras, varios muelles privados; 57 asentamientos humanos correspondientes a puertos pesqueros artesanales; 66 playas con instalaciones y diversas inversiones para el turismo [18]. Esta infraestructura costera debiera considerar cargas de tsunami, de acuerdo con una escala de clasificación por importancia y la repercusión económica, social y ambiental de su fallo o paralización temporal.

4.3. Localización de líneas de vida considerando el riesgo de tsunami

Estas líneas son esenciales para combatir la emergencia y por lo tanto, se debería mejorar su confiabilidad disminuyendo la probabilidad de falla. Como medida de planificación del uso del suelo, se debería considerar un ordenamiento territorial en las zonas de alto riesgo, basado en el tipo de actividad, funcionalidad e importancia de las edificaciones y, en la medida de lo posible, ubicar instalaciones de redes de comunicaciones, energía, agua y potenciales elementos contaminantes a cotas superiores a +10 [m] sobre el nivel del mar, tales como:

- Red de energía
 - Sistemas de generación y transmisión de electricidad, subestaciones de control.
 - Sistemas autónomos de generación eléctrica.
 - Oleoductos

- Sistemas de recepción, almacenamiento y distribución de gases.
- Puertos y terminales de carga / descarga de combustibles.
- Red de comunicaciones
 - Sistemas de comunicación terrestre (tendido eléctrico y tuberías).
 - Antenas de comunicación vía satélite.
 - Sistemas de emisión de televisión y radio.
- Red de Agua
 - Sistemas de agua potable
 - Sistemas de alcantarillado y aguas lluvias.
 - Estanques de almacenamiento de aguas.
- Elementos contaminantes
 - Estanques de almacenamiento de líquidos y materiales peligrosos.
 - Sitios de almacenaje de materiales químicos y radiactivos.

En aquellos casos en que las instalaciones de alta peligrosidad deban ser emplazadas en los sectores críticos, se podrían proteger mediante anclajes o muros de defensa. La protección mediante este tipo de estructuras constituye una buena medida para minimizar la acción hidrodinámica del tsunami y, aun cuando no sean suficientemente robustas para reflejar completamente las ondas, pueden ayudar a la mitigación del daño.

4.4. Implementación de planes de evacuación y educación de la población

Actualmente el 40% de la población urbana del Ecuador se encuentra en las principales ciudades de la Costa: Esmeraldas, Manta, Bahía de Caráquez, La Libertad, Guayaquil, Puerto Bolívar y Machala [18]. Toda esta población es vulnerable frente a un tsunami. En las entrevistas efectuadas a los sobrevivientes del tsunami del 2010 en Chile, se constató que a pesar de que el sistema de alarma no funcionó, casi no hubo pérdidas humanas que lamentar en las comunidades locales aun cuando la devastación fue impresionante.

De un universo compuesto entre 68 000 a 70 000 pescadores artesanales, solo perecieron doce en total [19]. La explicación es que la gran mayoría de la población había aprendido de sus padres o bien de campañas de información específicas, que ante un terremoto de larga duración que dificulte mantenerse en pie, es necesario buscar inmediatamente un punto alto y protegerse. Es por esto por lo que resulta importante instruir periódicamente a la comunidad local, y con

personal capacitado, sobre cómo actuar ante la eventualidad. Se debe tomar en cuenta que el ciudadano común tiene poco conocimiento del fenómeno y de las acciones a adoptar.

A largo plazo se deberían incorporar asignaturas relacionadas con el riesgo sísmico y de tsunamis en las mallas curriculares de las carreras universitarias de Ingeniería Civil, Construcción Civil, Arquitectura, Ingeniería Ambiental, Oceanografía, Biología Marina, Geografía, Pedagogías, Turismo, Administración Pública, Prevención de Riesgos y especialidades de las Fuerzas Armadas. Esta instrucción debiera orientarse según la injerencia que tendría este profesional para responder al desastre natural causado por un tsunami. Así mismo, se deberían poner en marcha en forma sistemática cursos de capacitación a organismos públicos que tengan relación con la planificación urbana y la defensa civil.

5. Conclusiones

Existen antecedentes de 58 tsunamis que han arribado al litoral ecuatoriano desde el año 1586 al 2012. De ellos, once (19%) fueron destructivos. De los once tsunamis destructivos, siete (63,6%) ocasionaron daños exclusivamente en el litoral continental, tres (27,3%) el litoral de las islas Galápagos y solo uno (9,1%) afectó tanto el litoral continental como el archipiélago.

De acuerdo con la distancia de generación de los tsunamis, el 50% de los tsunamis destructivos que asolaron el litoral continental son de campo cercano, el 25% de campo intermedio y el 25% de campo lejano. En las islas Galápagos, el 75% de los tsunamis destructivos fue de campo lejano, el 25% de campo cercano y ninguno de campo intermedio.

Un tsunami de campo cercano tiene tres veces más probabilidades de ser destructivo en el litoral continental que uno de campo intermedio o lejano. En Galápagos la posibilidad que un tsunami sea destructivo es independiente de la fuente de generación.

Se constató la existencia de tsunamis destructivos de campo lejano afectando el litoral continental e insular. Las islas Galápagos tienen un mayor riesgo de ser afectadas por un tsunami destructivo de campo lejano que el litoral continental. Si un tsunami de fuente lejana es destructivo en Galápagos, existe un 28% de posibilidades que sea destructivo en el litoral continental. Si un tsunami de campo cercano resulta destructivo en el litoral continental, entonces es casi seguro que será destructivo en Galápagos.

Agradecimientos

Financiamiento parcial: Fondo Desarrollo Disciplinario Facultad de Ingeniería Universidad de Playa Ancha; Dirección General de Investigación a través del proyecto

DGI ING-01/1213; Unión Iberoamericana de Municipistas, a través de una beca de Investigación para una estadía en Granada – España durante noviembre de 2012.

Referencias

- [1] S. Beck, “Variations in the rupture mode of large earthquakes along the south american subduction zone.” *Second ISAG, Oxford (UK)*, pp. 59–62, 1993.
- [2] A. Giesecke, A. Gómez, I. Leschiutta, E. Migliorini, and L. Rodríguez, “The ceresis earthquake catalogue and database of the andean region: background, characteristics and examples of use.” *Annals of Geophysics*, vol. 47(2/3), pp. 421–435, 2004.
- [3] R. Blanco-Chao, K. Pedoja, C. Witt, J. Martinod, L. Husson, V. Regard, L. Audin, M. Nexer, B. Delcaillau, M. Saillard, D. Melnick, J. F. Dumont, E. Santana, E. Navarrete, C. Martillo, M. Pappalardo, L. Ayala, J. F. Araya, A. Feal-Pérez, D. Correa, and I. Arozarena-Llopis, “The rock coast of south and central america.” *Geological Society, London, Memoirs*, vol. 40, pp. 155–191, 2014.
- [4] INOCAR, “Derrotero de las costas ecuatorianas,” Sexta edición, 2014. [Online]. Available: <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/derrotero-costas-ecuatorianas>, 2014.
- [5] M. Cruz, M. Acosta, and M. Vásquez, “Riesgos por tsunami en la costa ecuatoriana.” nacional del Ecuador del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Organizacion de Estados Americanos, OEA. Publicaciones de geofísica., 2005. [Online]. Available: <http://www.ipgh.gob.ec/index.php/geofisica/publicaciones/67-riesgos-por-tsunami-en-la-costa-ecuatoriana>
- [6] J. Espinoza, “Terremotos tsunamigénicos en el ecuador,” *Acta Oceanográfica del Pacífico. INOCAR*, vol. 7(1), pp. 21–28, 1992.
- [7] M. Contreras-López, “Cronología de tsunamis en ecuador desde 1586 a 2012,” *Revista "La Técnica" Universidad Técnica de Manabí*, no. 11, pp. 50–59, 2013.
- [8] RTU. (2011) Alerta de tsunami en ecuador. Canal de Noticias. (Junio de 2013). [Online]. Available: <http://www.rtu.com.ec/nacionales/15555-emergencia-de-tsunami-en-ecuador>
- [9] A. Acosta, “Breve historia económica del ecuador.” *Segunda edición actualizada. Corporación Editora Nacional, Quito.*, p. 406, 2006.
- [10] M. Contreras-López, “Tsunamis en ecuador: Cronologíaa desde catálogos y bases de datos mundiales,” *Documento Técnico N. 01/2014, Facultad de Ingeniería, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso*, p. 25, 2014.
- [11] P. Winckler, M. Reyes, and M. Contreras, “Recomendaciones de dise no de obras marítimas y terrestres sometidas a cargas de tsunamis.” *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, 123(1)*, pp. 19–39, 2011.
- [12] N. Shuto and K. Fujima, “A short history of tsunami research and countermeasures in japan.” *Proc. Japan. Acad., Ser. B 85*, no. 8, pp. 267–275, 2009.
- [13] J. Raskin, Y. Wang, M. Boyer, T. Fiez, J. Moncada, K. Yu, and H. Yeh, “An evacuation building project for cascadia earthquakes and tsunamis.” *Obras y Proyectos*, no. 9, pp. 11–22, 2011.
- [14] M. Lagos, “Tsunamis de origen cercano a las costas de chile.” *Revista de Geografía Norte Grande, 27*, pp. 93–102, 2000.
- [15] P. Arreaga, “Estudio de los tsunamis en la costa sur del ecuador (golfo de guayaquil).” *Pesquisa Naval*, no. 11, pp. 79–94, 1998.
- [16] P. Arreaga and M. Ortiz, “Análisis de riesgo de inundación por tsunamis en el golfo de guayaquil.” *Acta Oceanográfica del Pacífico*, vol. 11, pp. 23–29, 2002.
- [17] W. Rentería, “Elaboración de mapas digitales de inundación por tsunamis para machala y salinas basados en el tsunami histórico de 1953.” *Acta Oceanográfica del Pacífico*, pp. 207–216, 2007.
- [18] J. Espinoza, “Impactos de fenómenos oceánicos.” Centro Regional de Información sobre Desastres (CRID), p. 12, 2006. [Online]. Available: <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Enero2006/CD-1/pdf/spa/doc9219/doc9219-contenido.pdf>
- [19] A. Marín, S. Gelcich, G. Araya, G. Olea, M. Espíndola, and J. C. Castilla, “The 2010 tsunami in chile: Devastation and survival of coastal small-scale fishing communities.” *Marine Policy.*, vol. 34, pp. 1381–1384, 2010.