



Reevaluación de la amenaza sísmica para el cantón Portoviejo (Provincia de Manabí, Ecuador: una comparación de métodos determinístico y probabilístico)

Reassessment of the seismic threat for the Portoviejo canton (Manabí Province, Ecuador: a comparison of deterministic and probabilistic methods)

Reavaliação da ameaça sísmica para o cantão de Portoviejo (Província de Manabí, Equador: uma comparação de métodos determinísticos e probabilísticos)

Jorge Aguilar-Manzo ^I

jaguilarm1@outlook.es

<https://orcid.org/0000-0002-6148-2408>

Lincoln Javier García-Vinces ^{II}

lincoln.garcia@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8659-3190>

Marcos Geovanny Zevallos-Loor ^{III}

marcos.zevallos@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7979-8363>

Correspondencia: jaguilarm1@outlook.es

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

***Recibido:** 30 de diciembre de 2020 ***Aceptado:** 20 de marzo de 2021 * **Publicado:** 08 de abril de 2021

- I. Ingeniero Civil con Énfasis en Gerencia de Construcciones, Estudiante de la Maestría de Prevención y Gestión de Riesgos, Instituto de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Estructuras, Ingeniero Civil, Prevención en Riesgos Laborales, Instituto de Posgrado, Docente de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- III. Magister en Ciencias Mención Energía, Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Estructuras, Ingeniero Civil, Instituto de Posgrado, Docente de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Resumen

La presente investigación tiene la finalidad de mejorar el desempeño estructural de las construcciones en el cantón Portoviejo mediante un estudio de peligro sísmico. En la misma, se compararon dos métodos para la determinación del riesgo sísmico: determinístico y probabilístico. En el primero, se insertaron los parámetros de las fallas geológicas obtenidas a partir de un catálogo realizado por el Dr. Kervin Chunga, como son distancia de la falla a la fuente sísmica, longitud de la falla y máximo desplazamiento de la misma, donde se obtuvieron los valores máximos esperados tanto de magnitud M_w , como de aceleración pico en el terreno (PGA). En el segundo método, se introdujeron las características de las fuentes sísmicas obtenidas a partir de un catálogo sísmico, los modelos de atenuación tanto de las fuentes corticales como de las fuentes de subducción, los parámetros de sitio y las ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para determinar los valores máximos de PGA dentro de un período de retorno de 475 años. Los resultados reflejaron que los valores de aceleración sísmica obtenidos a través de este estudio, son superiores a los establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), por lo tanto, se debe realizar una reforma en la NEC-15 en cuanto al diseño sismorresistente.

Palabras clave: Método determinístico; método probabilístico; fuentes sísmicas; aceleración pico en el terreno; fuentes corticales; zonas de subducción; amenaza sísmica; período de retorno; curvas de peligro sísmico.

Abstract

The present investigation has the purpose of improving the structural performance of the constructions in the Portoviejo canton by means of a seismic hazard study. In this investigation, two methods for determining seismic risk were compared: deterministic and probabilistic. In the first method, the parameters of the geological faults obtained from a catalog made by Dr. Kervin Chunga were inserted, such as distance from the fault to the seismic source, fault length and maximum displacement of the fault, where it was obtained the maximum expected values of magnitude M_w and peak ground acceleration (PGA). In the second method, the characteristics of the seismic sources obtained from a seismic catalog, the attenuation models of both the cortical sources and the subduction sources, the site parameters and the predictive equations of the ground movement were introduced for determine maximum PGA values within a return period of 475 years. The results showed that the seismic acceleration values obtained through this study are higher than those established in the Ecuadorian

Construction Standard (ECS-15), therefore, a reform should be carried out in the ECS-15 as to earthquake resistant design.

Keywords: Deterministic method; probabilistic method; seismic hazard; seismic sources; peak ground acceleration; shallow crustal; subduction zone; return period; seismic hazard curves.

Resumo

A presente investigação tem como objetivo melhorar o desempenho estrutural das construções no cantão de Portoviejo através de um estudo de risco sísmico. Nele, foram comparados dois métodos de determinação do risco sísmico: determinístico e probabilístico. Na primeira, foram inseridos os parâmetros das falhas geológicas obtidos de um catálogo feito pelo Dr. Kervin Chunga, como distância da falha à fonte sísmica, comprimento da falha e deslocamento máximo da mesma, onde foram obtidos os valores máximos esperados de ambos magnitude Mw e aceleração de pico no solo (PGA). No segundo método, as características das fontes sísmicas obtidas a partir de um catálogo sísmico, os modelos de atenuação das fontes corticais e das fontes de subducção, os parâmetros do local e as equações preditivas do movimento do solo foram introduzidos para determinar os valores máximos de PGA dentro de um período de retorno de 475 anos. Os resultados refletiram que os valores de aceleração sísmica obtidos por meio deste estudo são superiores aos estabelecidos na Norma de Construção do Equador (NEC-15), portanto, uma reforma deve ser realizada no NEC-15 em termos de projeto resistente a terremotos. .

Palavras-chave: Método determinístico; método probabilístico; fontes sísmicas; pico de aceleração no solo; fontes corticais; zonas de subducção; ameaça sísmica; período de retorno; curvas de risco sísmico.

Introducción

Los sismos representan un alto grado de amenaza, debido a los daños causados en las estructuras, licuación de suelos saturados, subsidencia, grietas y fallas superficiales en el terreno, deslizamientos de taludes, levantamiento de acantilados, generación de tsunamis y deformaciones en el terreno.

El Ecuador se encuentra ubicado en una zona de alto riesgo sísmico, particularmente en el Cinturón de Fuego del Pacífico, la cual se denomina así debido a que se originan terremotos y erupciones volcánicas. Como consecuencia, se produce la interacción de las placas tectónicas Sudamericana y Nazca.

El terremoto del 16 de Abril del 2016 ha sido el evento más reciente en el territorio nacional, cuya magnitud de 7.8 Mw causó el colapso de viviendas y edificaciones en el país, siendo las ciudades de Pedernales, Manta y Portoviejo las que presentaron mayores daños.

Estudios de peligro sísmico antes del terremoto mencionado fueron realizados por algunos autores, entre ellos (Yepes et al., 1994), (Beauval et al., 2013), (Nocquet et al., 2012), (Parra Cárdenas, 2015) por mencionar los más importantes.

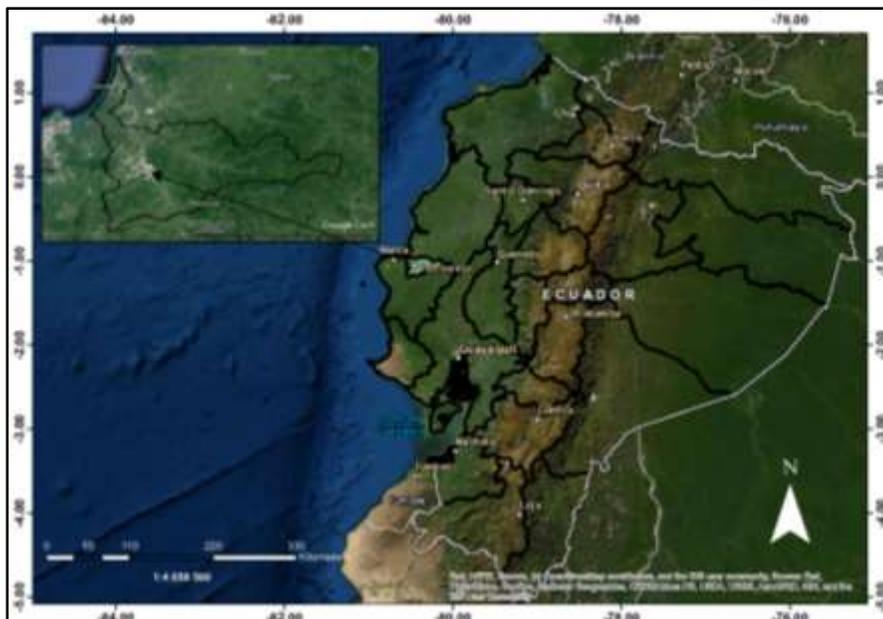
A raíz de este evento, se han realizado estudios de microzonificación sísmica en algunas ciudades como son Portoviejo (Instituto Geofísico IGEPN & Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, 2017), Quito (Aguilar, 2013), Cuenca (Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016) y Pedernales (Martínez González et al., 2017). Sin embargo, todavía no existe total cobertura en el país.

La presente investigación tiene la finalidad de mejorar el desempeño estructural de las construcciones en el cantón Portoviejo mediante un estudio de peligro sísmico. La misma nos dará nuevos parámetros de diseño sismorresistente con más altos estándares de seguridad.

Área de estudio

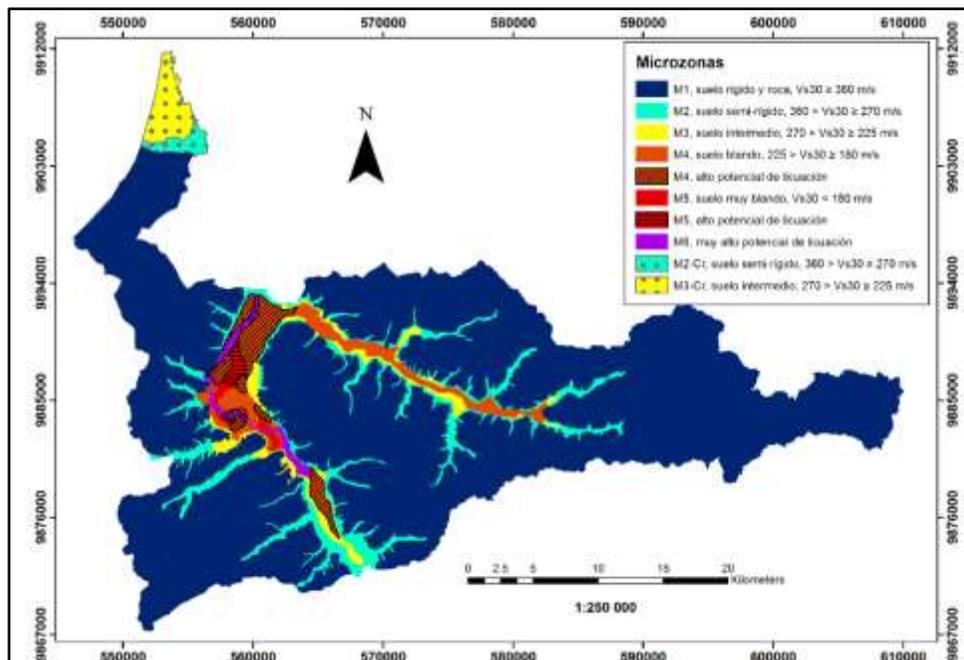
El cantón Portoviejo tiene una extensión territorial de 961 Km², se encuentra ubicado en la costa ecuatoriana, en la parte central del territorio nacional, tal como se observa en la Figura 1.(FLACSO ANDES, s. f.)

Figura 1: Mapa de ubicación del cantón Portoviejo dentro del territorio nacional. (INEC, 2020)



Los suelos de acuerdo con la clasificación presentada en la NEC-15 son C ($760 \text{ m/s} > v_{s30} \geq 360 \text{ m/s}$), D ($360 \text{ m/s} > v_{s30} \geq 180 \text{ m/s}$) y E-F ($v_{s30} < 180 \text{ m/s}$). Dentro del territorio existe un v_{s30} medio de 460 m/s , sin embargo, en muchos sectores existen valores de $v_{s30} < 180 \text{ m/s}$, por lo tanto, estos suelos son propensos a licuación, como se observa en la Figura 2. (Instituto Geofísico IGEPN & Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, 2017)

Figura 2: Mapa de microzonificación sísmica del cantón Portoviejo. (Instituto Geofísico IGEPN & Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, 2017)



Portoviejo está a una altitud media de 44 m.s.n.m. , presenta 4 zonas licuables geológicamente hablando: depósitos aluviales, flujo de lodos, límite costero y los miembros 2 bocas y Villigota. De lo mencionado anteriormente, las zonas más estables son los miembros 2 bocas y Villigota y las zonas más propensas a licuación son los depósitos aluviales y el flujo de lodos como se aprecia en la Figura 3. (INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO et al., 2012)

Dentro de la litología del cantón, el suelo predominante es de lutitas a limolitas, es decir, suelo rocoso blando (TIPO C), sin embargo, también se pueden encontrar arcillas, arenas, limos (Tipo D, E y F) como se presenta en la Figura 4.

Figura 3: Geología del Cantón Portoviejo. (Instituto Geofísico IGEPN & Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, 2017)

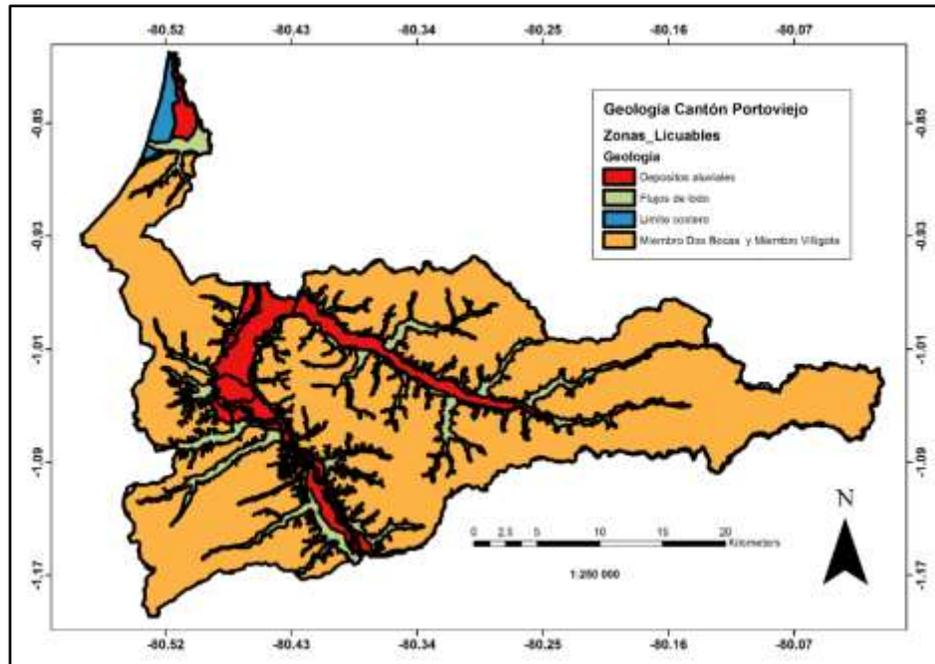
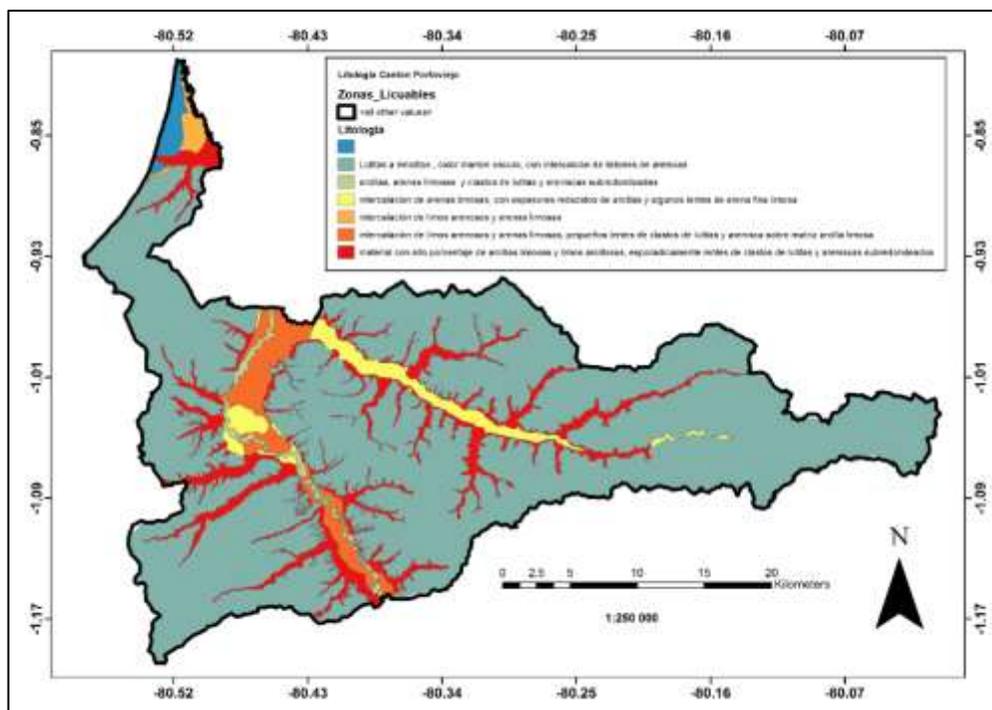


Figura 4: Litología del Cantón Portoviejo. (Instituto Geofísico IGEPN & Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, 2017)



Materiales y métodos

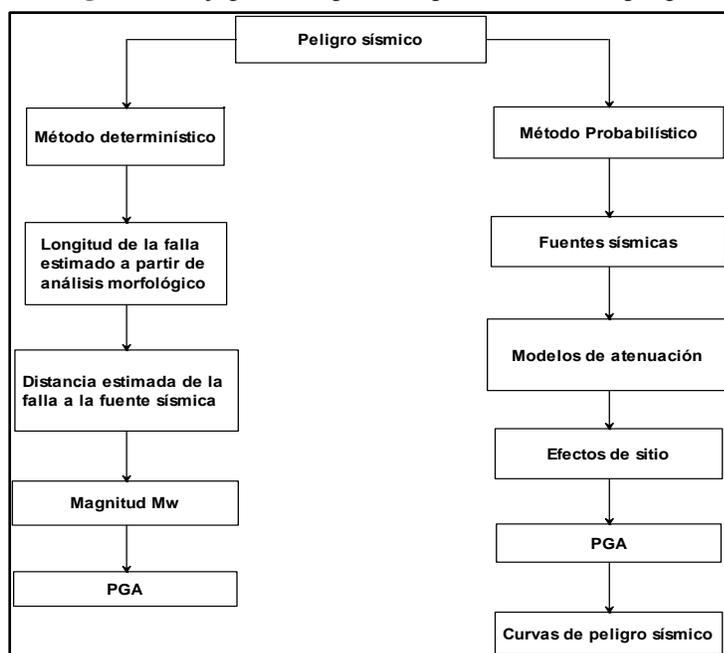
Los materiales utilizados para esta investigación son un shapefile del cantón Portoviejo, proporcionado por el INEC, las áreas sísmicas corticales y de subducción, un catálogo de fallas geológicas, un software libre llamado RCRISIS y una hoja electrónica del Excel.

Existen 2 métodos para realizar el estudio de peligro sísmico: determinístico y probabilístico.

- El primero se basa en el estudio de la geología, es decir, mediante un catálogo de fallas geológicas podemos determinar cuál sería la aceleración máxima en el terreno (PGA) y la magnitud máxima del sismo esperada M_w , mediante el uso de un software se realiza una interpolación de los valores de magnitud y aceleración obtenidos y se generan los mapas de amenaza sísmica. (Feng et al., 2020)
- El segundo se basa en el uso de un software libre llamado RCRISIS desarrollado por el Instituto de Evaluación de Riesgos Naturales (ERN) de México en alianza con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México (IINGEN UNAM) en el año 2017. En el mismo se insertarán las fuentes sísmicas, los parámetros de las mismas, ordenadas espectrales, los modelos de atenuación, efectos de sitio. Los resultados son los mapas de peligro sísmico, con su respectiva probabilidad de excedencia y sus valores de aceleración bajo esas condiciones. (R-CRISIS, 2017)

Finalmente, se realizará un análisis de los resultados mediante ambas metodologías citadas anteriormente, tal como se detalla en la Figura 5.

Figura 5: Flujoograma de procesos para el estudio de peligro sísmico.



Método determinístico

Para el cálculo de la magnitud de momento (M_w) mediante el método determinístico se utilizará la expresión de Well and Coppersmith (1994):

$$M_w = 5 + 1.2 * \log H \quad (1)$$

Donde:

M_w = es la magnitud de momento del sismo.

H = distancia estimada de la falla a la fuente sísmica en Km.

Para obtener el máximo desplazamiento de la falla (MD), se requiere la siguiente expresión:

$$MD = 10^{(-1.38+1.02*\log(L))} \quad (2)$$

Donde:

MD = máximo desplazamiento de la falla en metros.

L = longitud de la falla en Km.

Por último, para determinar la aceleración pico en el terreno (PGA), es necesario usar la siguiente fórmula:

$$\log_{10} A = 0.42 * M_w - \log(R + 0.025 * 10^{0.42*M_w}) - 0.0033 * R + 1.22 \quad (3)$$

Donde:

A = aceleración pico del terreno en cm/s^2

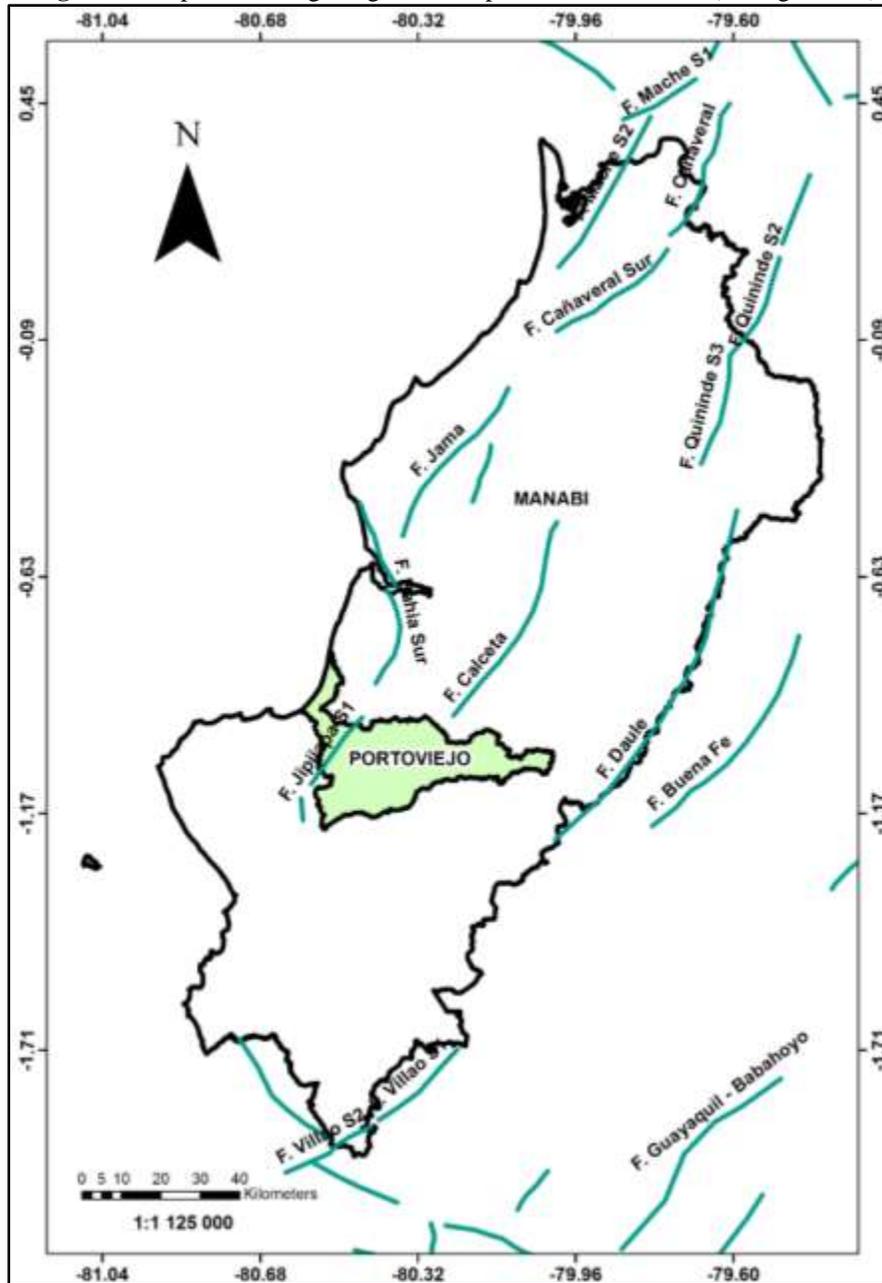
M_w = Magnitud de momento.

R : distancia más corta entre el sitio y la falla de ruptura en Km.

(Fukushima & Tanaka, s. f.)

En el presente mapa se observan las fallas geológicas presentadas en la provincia de Manabí, donde se tomará en consideración para el estudio las fallas de Jipijapa S1, Bahía Sur, Calceta y la de Daule, debido a la influencia que pueden tener en el cantón Portoviejo.

Figura 6: Mapa de fallas geológicas en la provincia de Manabí (Chunga, 2010)



La tabla 4 presenta las características morfométricas de las fallas geológicas cercanas al cantón Portoviejo, donde L y H son valores conocidos, M_w se calcula mediante la ecuación (1), MD se determina mediante la ecuación (2) y el valor de A se calcula obtiene mediante la expresión (3), mencionadas anteriormente.

Tabla 1: Catálogo de fallas geológicas cercanas al cantón Portoviejo (Chunga, 2010)

Id.	Nombre de la falla	Longitud de la falla estimado mediante análisis morfológico (Km)	H estimado desde datos sísmicos (Km)	Mw calculado de la relación Well & Coppermish (1994)	MD (en mt) calculado de la relación Well & Coppermish (1994)	A (en g) Fukushima y Tanaka (1990)
26	F. Calceta	57.19	17	7.1	1.5	0.26
27	F. Daule	97.18	18	7.4	1.9	0.14
30	F. Bahia Sur	25.92	6	6.7	1.1	0.25
31	F. Jipijapa S1	21.62	25	6.6	1.0	0.27

Método probabilístico

El mismo será realizado mediante el software R-CRISIS.

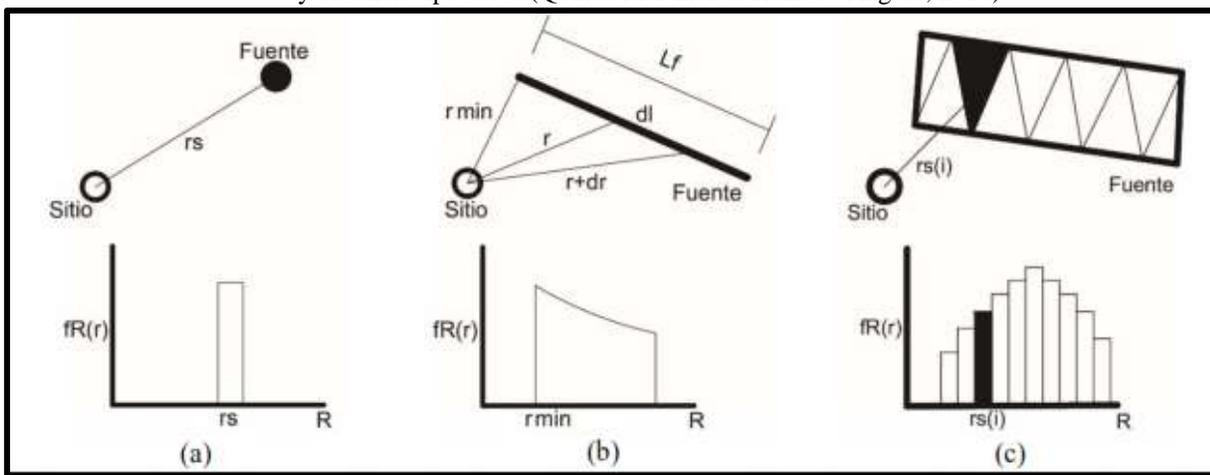
Se utilizarán las fuertes corticales y las fuentes de subducción, propuestas por Chunga en el año 2010. Como datos de entrada tenemos las fuentes sísmicas, los modelos de atenuación, las ordenadas espectrales, los efectos de sitio (vs30, periodos de suelo, entre otros).(Midzi et al., 2020)

Caracterización de las fuentes sísmicas.

Los parámetros a analizar en las mismas son su forma, distancia fuente-sitio, y la sismicidad. Distancia fuente-sitio.

La misma depende del tipo de fuente establecida anteriormente, puntual, lineal o aérea.

Figura 7: Tipos de fuentes y distancias fuente-sitio. (a) Fuente y distancia puntual, (b) fuente y distancia lineal y (c) fuente y distancia tipo aérea.(Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016)



Las fuentes utilizadas para el estudio son de tipo (c), mostradas en la Figura 5.

Sismicidad de las fuentes.

Para un estudio probabilístico, es primordial conocer la recurrencia y nivel de daños que pueden ocasionar los eventos sísmicos en una misma fuente. Para objetos de simplificación, se considera que los sismos tienen la misma probabilidad de ocurrencia dentro de una misma fuente. (Rivadeneira et al., 2007)

Primeramente, se debe conocer la tasa de excedencia de intensidades $\lambda(M)$. Luego, se realiza una revisión del catálogo sísmico para conocer las magnitudes de los eventos sismotectónicos principales mediante la relación de Gutenberg-Richter (GR) representada en las siguientes ecuaciones: (Farahani et al., 2020)

$$\log \lambda(M) = a + bM \quad (4)$$

$$\lambda(M) = e^{a-\beta M} \quad (5)$$

Donde, $\lambda(M)$ es la tasa media anual de excedencia de un sismo con magnitud M , $\alpha = a * \ln(10)$ y $\beta = b * \ln(10)$. El valor a es el número de eventos sismo tectónicos con magnitud cero que ocurren en ese lugar. El factor b es la pendiente de la curva obtenida respecto al número acumulado de sismos. (Falcone et al., 2020)

Para el cálculo de la tasa anual de excedencia se utilizará el modelo de Gutenberg-Richter truncado, definido de la siguiente manera:

$$\lambda(M) = v * \left[\frac{e^{-\beta(M-M_0)} - e^{-\beta(M_u-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u-M_0)}} \right]; \text{ para } M_0 \leq M \leq M_u \quad (6)$$

En la cual $\lambda(M)$ es la tasa anual de excedencia, M_0 y M_u son las magnitudes máximas y mínimas consideradas dentro del catálogo sísmico de cada fuente, v y β son factores que definen la tasa de excedencia de las fuentes sísmicas calculadas mediante métodos estadísticos. (Eluyemi et al., 2020)

Cabe recalcar, que además de estudiar las incertidumbres causadas por las magnitud y localización de eventos tectónicos, se deben tomar en consideración incertidumbres temporales mediante el modelo de Poisson, el mismo que es de tipo exponencial, siendo ambos sismos independientes en el tiempo. Su probabilidad de ocurrencia en un lapso de tiempo está compenetrado únicamente al tamaño del mismo, y es completamente libre del tiempo transcurrido al sismo más actual. Se determina mediante la siguiente ecuación: (Abdalzaher et al., 2020)

$$P(N = n) = \frac{e^{-\lambda(M)t} [e^{-\lambda(M)t}]^n}{n!} \quad (7)$$

La Figura 8 nos muestra los bloques de corticales propuestos por el Dr. Chunga en el año 2010, los bloques 3, 4, 5, 6 y 7 serán utilizados en la investigación para el análisis de amenaza sísmica. En la Figura 9 se muestran los bloques de subducción utilizados para esta investigación.

Figura 8: Mapa de bloques corticales propuestos para el cantón Portoviejo (Chunga, 2010)

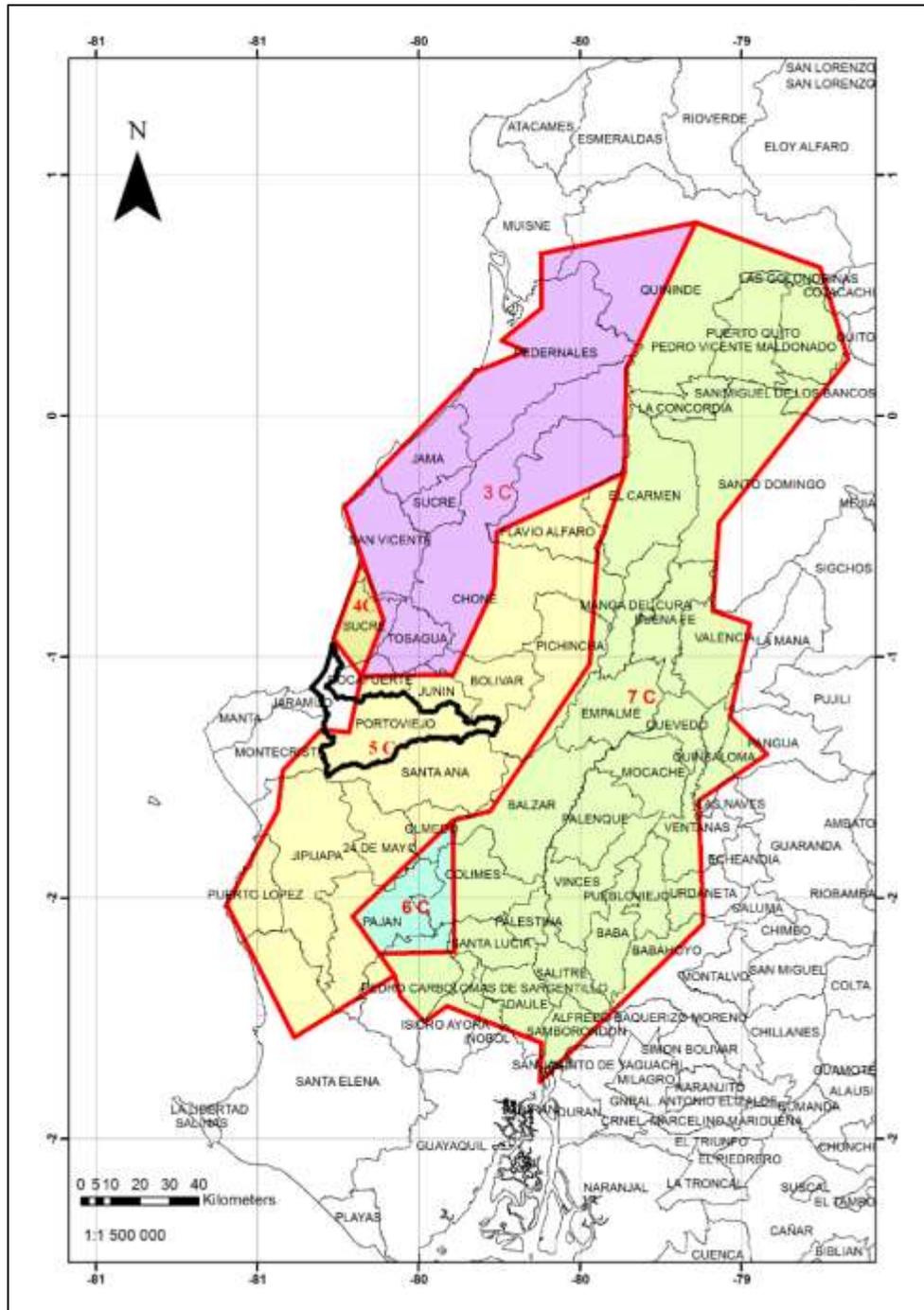
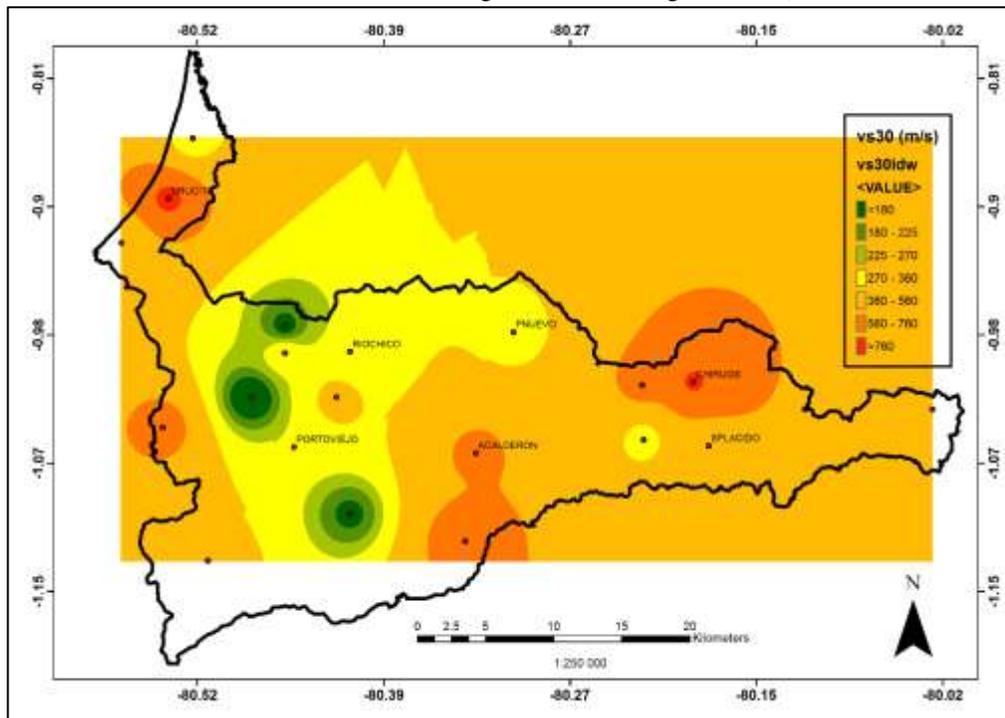


Figura 10: Mapa de vs30 para el cantón Portoviejo a escala 1:250.000 (Instituto Geofísico IGEPN & Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, 2017)



En las tablas 3 y 4 se presentan las características de las fuentes corticales y de subducción respectivamente, correspondientes al modelo de Gutenberg y Ritchler Modificado, donde M_0 y M_u son los valores mínimos y máximos para cada fuente, λ es la tasa media anual de excedencia de un sismo de magnitud M , β depende de los valores de a y b , c es el coeficiente de variación de β , todos estos parámetros se encuentran en los catálogos sísmicos. (Rivas-Medina et al., 2014)

Tabla 2: Parámetros de las fuentes sísmicas corticales.

BLOQUES	M_0	λ	β	c	$E (M_u)$
3	4.50	1.26	2.31	0.13	7.20
4	4.50	1.26	2.31	0.13	7.20
5	4.50	1.26	2.31	0.13	7.20
6	4.50	1.26	2.31	0.13	7.20
7	4.50	1.26	2.31	0.13	7.20

Tabla 3: Parámetros de las fuentes sísmicas de subducción.

BLOQUES	M_0	λ	β	c	$E (M_u)$
3	4.80	0.62	1.79	0.30	7.60
7	4.10	2.95	1.75	0.09	7.30
8	4.10	2.95	1.75	0.09	7.30

Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo

Para entender la disipación de las ondas sísmicas, desde su epicentro al sitio se necesita el empleo de los modelos de atenuación, en los cuales interactúan variables como la magnitud, posición relativa fuente-sitio, profundidad, mecanismo focal, entre otros. Se denota mediante la siguiente expresión:(Yepes et al., 1994)

$$A = f(M, R, d, \text{tipo de suelo, mecanismo focal} \dots) \quad (8)$$

En la cual, M es la magnitud, R la distancia entre el sismo y la fuente y d la profundidad a la que ocurre el evento.

Debido a las incógnitas presentadas en los modelos de atenuación, tales como son la velocidad, aceleración, desplazamiento, entre otras, se recomienda utilizar una distribución lognormal, con una mediana y desviación estándar establecidos de la siguiente manera:

$$Pr(A > a|M, r) = \Phi \left[\frac{E(\ln(a)|M, r) - \ln(a)}{\sigma \ln(a)} \right] \quad (9)$$

Donde, Φ es la distribución normal acumulada, $E(\ln(a)|M, r)$ es el valor esperado del logaritmo de la intensidad de la ley de atenuación respectiva, y $\sigma \ln(a)$ es la desviación estándar del logaritmo de a.(Beauval et al., 2013)

El modelo de atenuación de Abrahamson & Silva (1997) se realizó en base al análisis de 2675 registros de acuerdo con 129 sismos superficiales originados en distintas regiones sísmicas activas a nivel mundial. El modelo de atenuación de Youngs, fue realizado en base al análisis a sismos interfase e interplaca con $M_w \geq 5$, con distancias entre 10 a 500 km.(Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016)

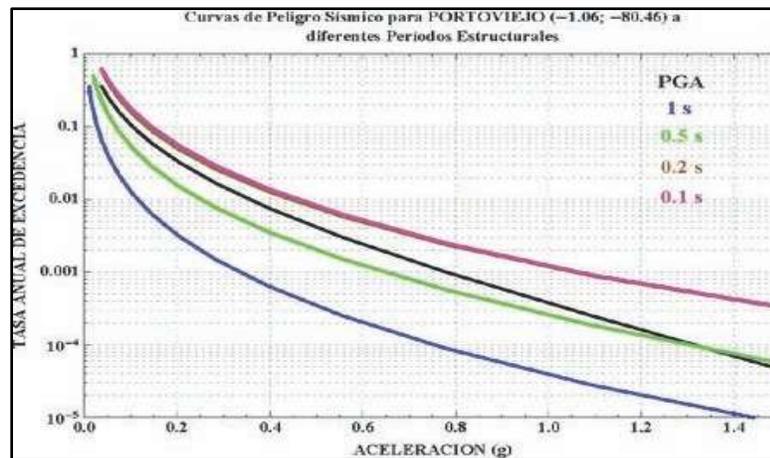
Tabla 4: Características de los modelos de atenuación utilizados (Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016)

Nombre	Intervalo de periodo espectral (s)	Intervalo de distancia válido (Km)	Intervalo de magnitud válido (Mw)	Tipo de medida de distancia	Región tectónica
Abrahamson & Silva (1997)	0.01-5.0	0.1-200	4.0-7.5	Distancia a la ruptura	Corteza superficial
Youngs et al (1997)	0-3	10-500	5-8.5	Distancia a la ruptura	Subducción

Curvas de peligro sísmico

De acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 15, estas son las curvas de peligro sísmico para el cantón Portoviejo.

Figura 11: Curvas de peligro sísmico para Portoviejo. (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda & Cámara de la Industria y la Construcción, 2015)



Resultados

Método determinístico

Figura 12: Mapa de magnitudes máximas M_w esperadas para el cantón Portoviejo.

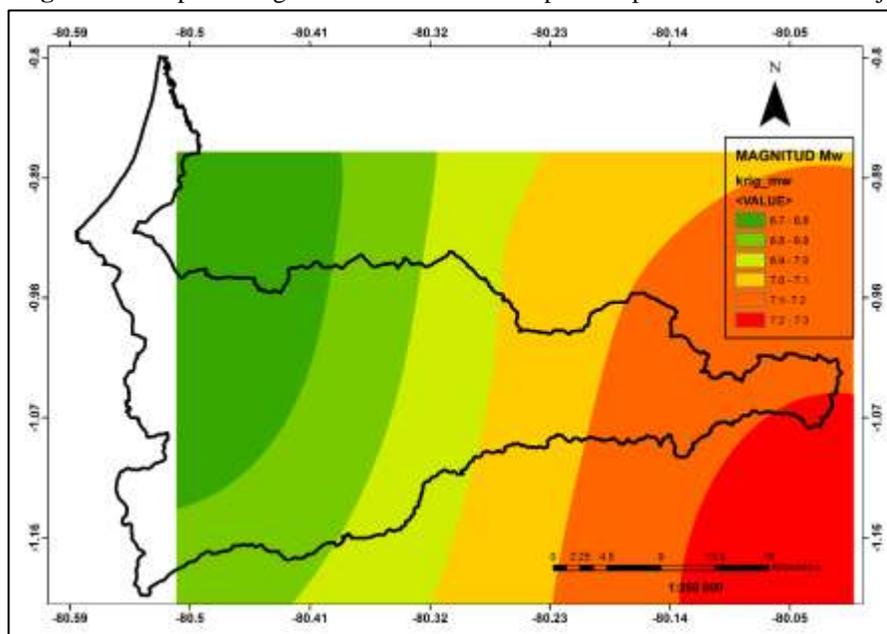
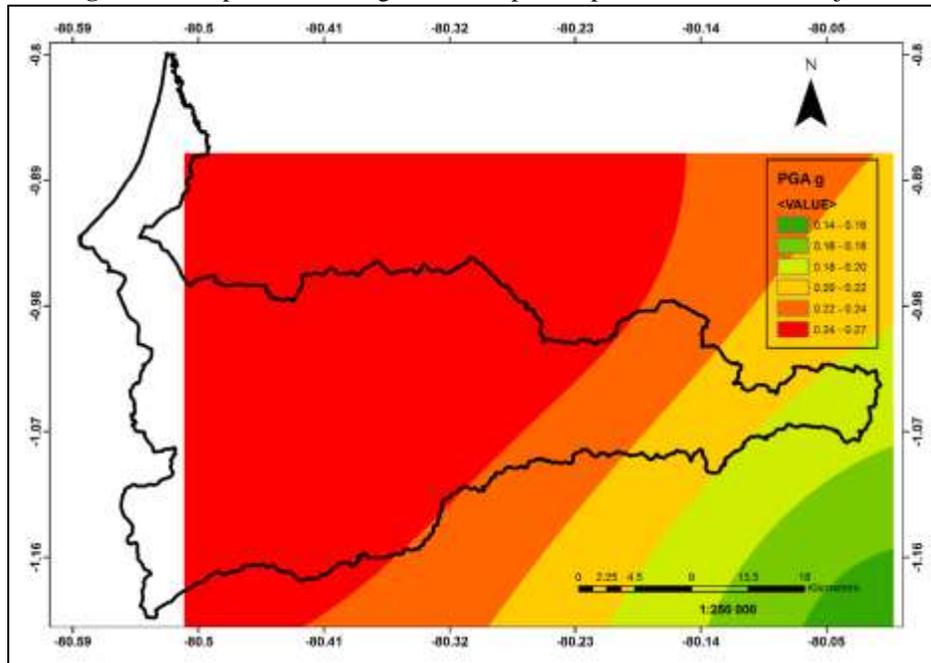


Figura 13: Mapa de PGA en g máxima esperado para el cantón Portoviejo.



Método probabilístico

Figura 14: Mapa de PGA del Cantón Portoviejo para fuentes corticales en un periodo de retorno de 475 años.

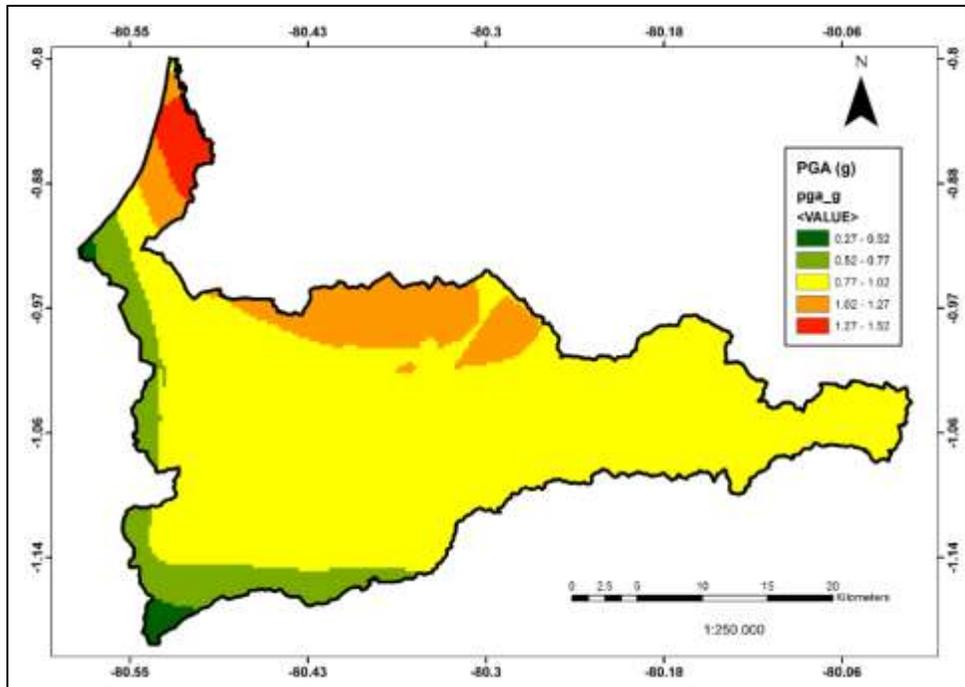
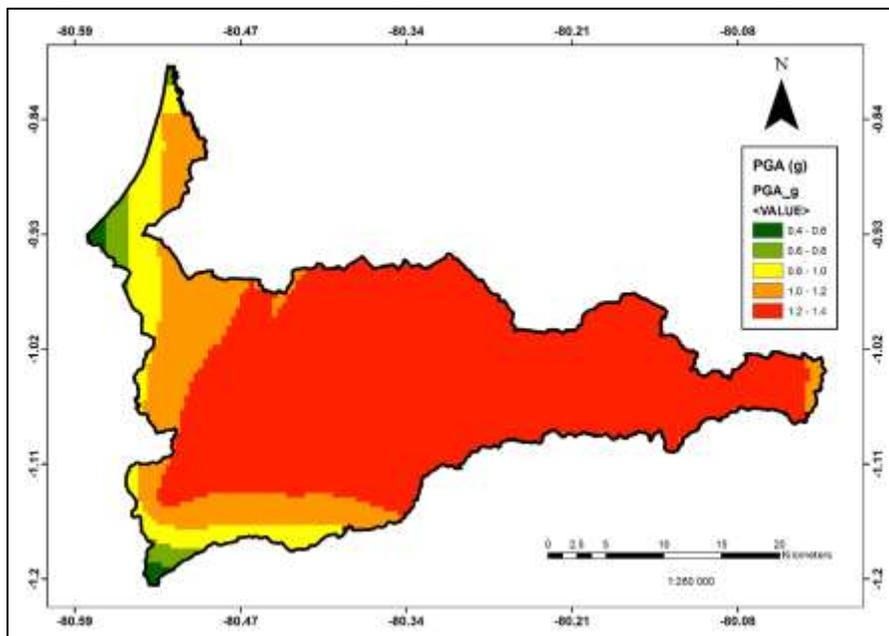


Figura 15.: Mapa de PGA del Cantón Portoviejo para fuentes de subducción en un periodo de retorno de 475 años.



Curvas de peligro sísmico

Figura 16: Curvas de peligro sísmico del cantón Portoviejo para fuentes corticales.

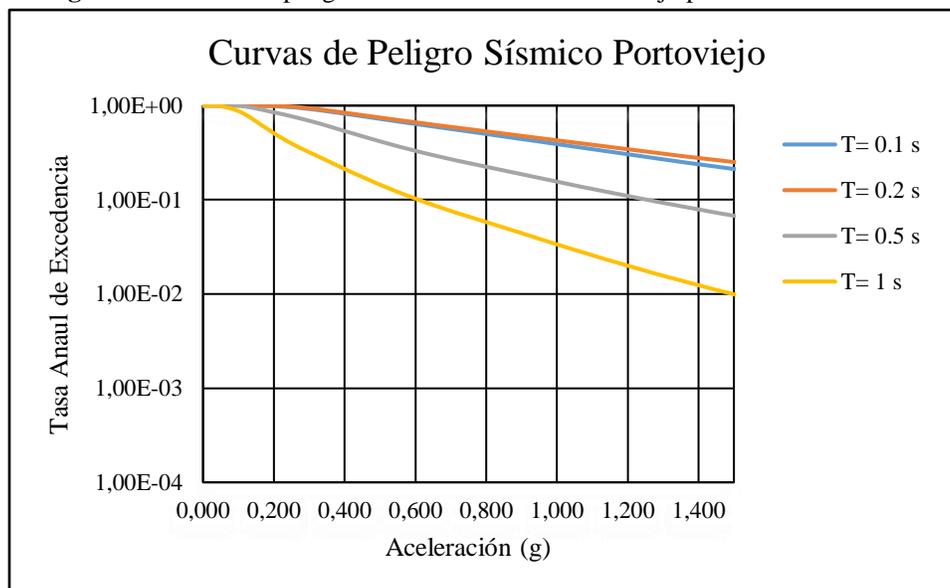
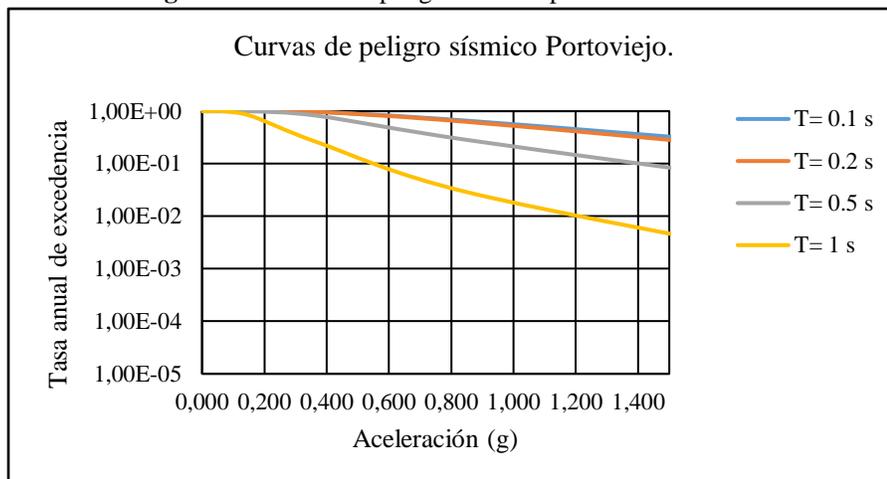


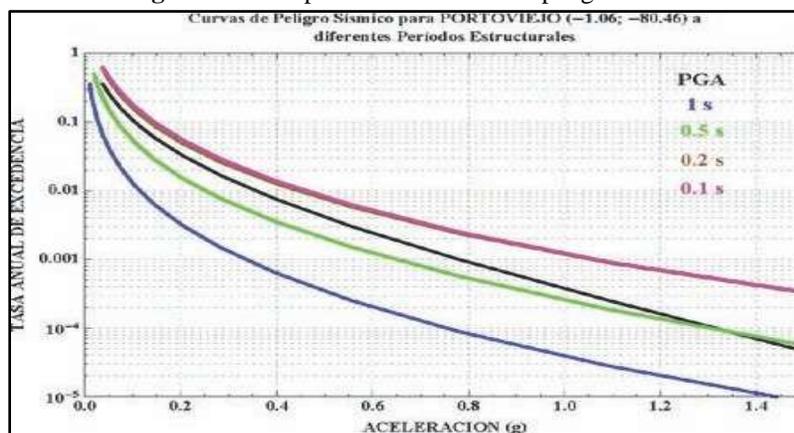
Figura 17: Curvas de peligro sísmico para fuentes de subducción.



Discusión

De acuerdo con el método determinístico, la magnitud de un sismo máxima esperada M_w es de 7,3 y la aceleración máxima esperada PGA es de 0,27 g. Sin embargo, por el método probabilístico, tenemos que para un período de retorno de 475 años la aceleración máxima esperada para el cantón ante fuentes corticales es de 1.5 g, mientras que ante fuentes de subducción es de 1.4 g. No obstante, la diferencia entre estos mapas está que la concentración de aceleración en fuentes corticales es de 1 g mientras que ante fuentes de subducción la mayor parte del territorio tiene un PGA de 1.4 g. Si hacemos una comparativa con la Norma Ecuatoriana de la Construcción los valores obtenidos en esta investigación son superiores, la NEC-15 nos dice que para la ciudad de Portoviejo la aceleración para los espectros de diseño es de 0,5 g, por lo que los parámetros de diseños sismorresistente son subvalorados en la NEC-15.

Figura 18: Comparación de curvas de peligro sísmico.



Realizando una comparación de las curvas de peligro sísmico, los valores de tasa anual de excedencia son superiores para los mismos valores de aceleración. Por lo tanto, el diseño planteado en esta investigación es mucho más riguroso que la norma NEC-15.

Conclusiones

La aceleración máxima esperada para el cantón Portoviejo mediante el método determinístico es de 0,27 g y la magnitud máxima esperada M_w es de 7,3.

El valor de PGA máximo esperado para Portoviejo en un periodo de retorno de 475 años ante fuentes de subducción es de 1,4 g, mientras que para fuentes corticales es de 1,5 g.

Utilizando el método probabilístico se obtienen aceleraciones en el terreno superiores a las propuestas por la NEC-15, lo que podría poner en riesgo a las edificaciones de Portoviejo.

Si bien el método determinístico mediante las fallas geológicas es muy útil ya que no requiere de un catálogo sísmico, los resultados de la aceleración sísmica no consideran las fuentes sísmicas, por lo tanto, los mismos difieren bastante del método probabilístico, los valores de aceleración son mucho menores.

Las curvas de peligro sísmico determinadas en esta investigación ante fuentes corticales y de subducción son similares en comportamiento, sin embargo, difieren con las curvas presentadas en la NEC-15, ya que ante los mismos valores de aceleración se presentan mayores tasas de excedencia, por lo que el diseño sismorresistente propuesto por la NEC-15 es muy conservador.

El método probabilístico es mucho más completo que el determinístico, debido a que presenta todos los parámetros de sismicidad, las fuentes sísmicas, los modelos de atenuación, por lo tanto, sus resultados son bastante confiables.

Se recomienda una mejor estructuración de la NEC-15, estudios de microzonificación sísmica en todas las ciudades del país, para de esta manera mejorar los criterios de diseño estructural y prevenir el colapso de edificaciones y otras infraestructuras.

Agradecimiento

Agradezco al Dr. Kervin Chunga por su aporte en la investigación, de igual forma, al Ing. Jimer Navia por su asesoría en la realización de este trabajo.

Referencias

1. Abdalzaher, M. S., El-Hadidy, M., Gaber, H., & Badawy, A. (2020). Seismic hazard maps of Egypt based on spatially smoothed seismicity model and recent seismotectonic models. *Journal of African Earth Sciences*, 103894. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103894>
2. Aguiar, R. (2013). Microzonificación Sísmica de Quito.
3. Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguiar, J., Troncoso, L., & Vaca, S. (2013, abril). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador | Bulletin of the Seismological Society of America | GeoScienceWorld*. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/103/2A/773/331682/An-Earthquake-Catalog-for-Seismic-Hazard?redirectedFrom=fulltext>
4. Chunga, K. (2010). (11) (PDF) Terremoti crostali e zonazione sismica dell'Ecuador attraverso l'integrazione dei dati geologici, sismologici e morfostrutturali [Universidad de Insubria]. https://www.researchgate.net/publication/317100019_Terremoti_crostali_e_zonazione_sismica_dell'Ecuador_attraverso_l'integrazione_dei_dati_geologici_sismologici_e_morfostrutturali
5. Eluyemi, A. A., Ibitoye, F. I., & Baruah, S. (2020). Preliminary analysis of probabilistic seismic hazard assessment for nuclear power plant site in nigeria. *Scientific African*, e00409. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00409>
6. Falcone, G., Mendicelli, A., Mori, F., Fabozzi, S., Moscatelli, M., Occhipinti, G., & Peronace, E. (2020). A simplified analysis of the total seismic hazard in Italy. *Engineering Geology*, 267, 105511. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105511>
7. Farahani, S., Behnam, B., & Tahershamsi, A. (2020). Probabilistic seismic multi-hazard loss estimation of Iran gas trunklines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 66, 104176. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104176>
8. Feng, J., Wang, E., Ding, H., Huang, Q., & Chen, X. (2020). Deterministic seismic hazard assessment of coal fractures in underground coal mine: A case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105921>
9. FLACSO ANDES. (s. f.). El cantón Portoviejo. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/catalog/resGet.php?resId=13938>

10. Fukushima, & Tanaka. (s. f.). Fukushima & Tanaka (1990, 1992). Recuperado 6 de julio de 2020, de https://iisee.kenken.go.jp/eqflow/reference/1_10.htm
11. GAD Municipal Portoviejo. (2016). ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN PORTOVIEJO. <https://www.portoviejo.gob.ec/md-transparencia/2017/julio-2017/Plan%20de%20Ordenamiento.pdf>
12. INEC. (2020). INEC. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>
13. INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO, SENPLADES, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, & INIGEMM. (2012). PROYECTO: “GENERACIÓN DE GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL. 1: 25.000”. http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/ZONA4/NIVEL_DEL_PDOT_CANTONAL/MANABI/PORTOVIEJO/IEE/MEMORIAS_TECNICAS/mt_portoviejo_geomorfologia.pdf
14. Instituto Geofísico IGEPN, & Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. (2017). Estudio de microzonificación sísmica del cantón Portoviejo, segunda fase.
15. Martínez González, J. A., León Torres, J. A., Hernández-Velasco, E., Rojas Hernández, R., Sánchez-González, J., & Mina-Hernández, R. (2017, septiembre). (13) (PDF) AMENAZA SÍSMICA, MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO DE LA CIUDAD DE PEDERNALES, MANABÍ, ECUADOR. https://www.researchgate.net/publication/320433596_AMENAZA_SISMICA_MICROZONIFICACION_SISMICA_Y_ESPECTROS_DE_DISENO_DE_LA_CIUAD_DE_PEDERNALES_MANABI_ECUADOR
16. Midzi, V., Manzunzu, B., Mulabisana, T., Zulu, B. S., Pule, T., & Myendeki, S. (2020). Probabilistic seismic hazard maps for South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 162, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103689>
17. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, & Cámara de la Industria y la Construcción. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-DS-Peligro-S%C3%ADsmico-parte-1.pdf>
18. Nocquet, J.-M., Mothes, P., & Alvarado, A. (2012). Geodésia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador.

19. Parra Cárdenas, H. A. (2015). Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito (east=-78.46783820000002; north=-0.1806532; name=Quito, Ecuador) [Phd, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM)]. <http://oa.upm.es/39353/>
20. Quinde Martínez, P. D., & Reinoso Angulo, E. (2016). ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO DE ECUADOR Y PROPUESTA DE ESPECTROS DE DISEÑO PARA LA CIUDAD DE CUENCA. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 94, 1. <https://doi.org/10.18867/ris.94.274>
21. R-CRISIS. (2017). R-Crisis. <http://www.r-crisis.com/>
22. Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador—Instituto Geofísico—EPN. Corporación Editora Nacional. <https://www.igeppn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/comunidad-espanol/35-breves-fundamentos-sobre-los-terremotos-en-el-ecuador>
23. Rivas-Medina, A., Aguiar, R., & Benito, B. (2014). Determinación el período de recurrencia y magnitud máxima para el control de las estructuras en el rango elástico ante un sismo asociado a las fallas inversas de Quito. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 192, 203-221.
24. Yepes, H., Chatelain, J.-L., & Guillier, B. (1994). Estudio del riesgo sísmico en el Ecuador.