

Evaluación del riesgo sísmico en Ecuador mediante el uso del software R-Crisis

Andrea Zarate¹  Alexis Andrade¹  Kleber Jaramillo¹  Karen Mendoza¹  Luis Toapanta¹ 

¹ Carrera de Civil, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 0601

✉ Correspondencia: kmmendoza.fic@unach.edu.ec  +593 0987993687

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj62093>

Resumen: La investigación aborda el riesgo sísmico en Ecuador, un país ubicado en el cinturón de fuego del Pacífico con historial de eventos sísmicos significativos. A pesar de la normativa vigente sobre peligro sísmico, se reconoce la necesidad de una evaluación actualizada. Para comprender a fondo el nivel de riesgo sísmico actual en el país, se llevó a cabo un análisis probabilístico del peligro sísmico. Este análisis se basó en fuentes sismogénicas actualizadas y una revisión exhaustiva del catálogo sísmico de la última década. Además, se crearon dos subfuentes sísmicas en las regiones de Manabí y Esmeraldas para obtener una evaluación más precisa. El estudio se centra en las provincias de Guayas, Chimborazo y Pastaza, destacando que las aceleraciones en Guayaquil, Riobamba y Puyo superan los límites establecidos en la NEC 15. Se concluye que la peligrosidad influye significativamente en el riesgo sísmico, con una vulnerabilidad generalmente media a alta en las edificaciones.

Palabras claves: Aceleración, curvas de peligrosidad, fuentes sismogénicas, peligro sísmico, riesgo sísmico.

Assessment of seismic risk in Ecuador through the use of R-Crisis software

Abstract: The research addresses seismic risk in Ecuador, a country located in the Pacific Ring of Fire with a history of significant seismic events. Despite existing seismic hazard regulations, the need for an updated assessment is recognised. To gain a thorough understanding of the current level of seismic risk in the country, a probabilistic seismic hazard analysis was carried out. This analysis was based on updated seismogenic sources and a comprehensive review of the seismic catalogue of the last decade. In addition, two seismic sub-sources were created in the regions of Manabi and Esmeraldas to obtain a more accurate assessment. The study focuses on the provinces of Guayas, Chimborazo and Pastaza, highlighting that accelerations in Guayaquil, Riobamba and Puyo exceed the limits established in NEC 15. It is concluded that hazard significantly influences seismic risk, with generally medium to high vulnerability in buildings..

Keywords: Acceleration, hazard curves, seismogenic sources, seismic hazard, seismic risk.



Check for updates

Cita: Zarate, A., Andrade, A., Kleber, J., Mendoza, K., & Toapanta, L. (2023). Evaluación del riesgo sísmico en Ecuador mediante el uso del software R-Crisis. *Green World Journal*, 02(06), 93. <https://doi.org/10.53313/gwj62093>

Received: 15 / septiembre /2023

Accepted: 20 /noviembre/2023

Published: 15/diciembre /2023

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2023 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license. Creative Commons Attribution (CC BY). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

1. Introducción

Ecuador, situado en el cinturón de fuego del Pacífico, enfrenta una constante amenaza sísmica debido a su ubicación geográfica. A lo largo de su historia, el país ha experimentado impactantes eventos sísmicos que han dejado una huella significativa en diversas regiones. Uno de los episodios más notables fue el terremoto de 1906, que alcanzó una magnitud de 8.8 en las costas del Norte de Ecuador [1]. Más recientemente, en 2016, un sismo de magnitud 7.8 se catalogó como uno de los más destructivos de los últimos años, generando considerables pérdidas humanas y económicas, especialmente en las ciudades de Pedernales, Manta y Portoviejo [2].

La vulnerabilidad sísmica de Ecuador se ve exacerbada por su historial de sismos de alta magnitud, a menudo vinculados a procesos de subducción que generan terremotos cercanos a zonas pobladas. Estos eventos sísmicos impactan drásticamente en la población, la infraestructura y la economía, provocando retrasos en el desarrollo del país [3].

La evaluación del riesgo sísmico en Ecuador se convierte en una tarea crucial dada la persistente amenaza sísmica. Según [4], el peligro sísmico en el país está principalmente determinado por dos tipos de fuentes sísmicas: subducción (interfase e intraplaca) y corticales. Cada una de estas fuentes experimenta procesos independientes de acumulación y liberación de energía, lo que da lugar al fenómeno de migración de fuentes sísmicas a lo largo del tiempo. Es esencial comprender estos cambios para anticipar y gestionar adecuadamente las amenazas sísmicas [5].

La elaboración de modelos de atenuación se realiza a partir de los parámetros sísmicos de cada fuente, estableciendo las relaciones de atenuación de las intensidades sísmicas relevantes. Estos modelos se basan en estudios previos que se ajustan a los mecanismos de falla de las fuentes sismogénicas de Ecuador, según [3].

El riesgo sísmico, conceptualizado por [6] se define como la probabilidad de que la población sufra pérdidas y daños en sus medios de vida, siendo resultado de la interacción entre la peligrosidad y la vulnerabilidad sísmica. [7] caracteriza la peligrosidad como la probabilidad de un movimiento sísmico de cierta magnitud en un emplazamiento específico durante un período de tiempo determinado. Por otro lado, [8] destaca que la vulnerabilidad es una variable modificable que depende de factores como el tipo de sistema estructural, irregularidades en las edificaciones, mantenimiento y aplicación de normativas de construcción.

El objetivo central de la presente investigación es llevar a cabo una evaluación exhaustiva del riesgo sísmico en Ecuador utilizando el Software R-CRISIS. Este enfoque permitirá determinar la vigencia de los factores de peligrosidad sísmica establecidos por la normativa ecuatoriana, identificando la necesidad de posibles actualizaciones para fortalecer la resiliencia del país ante futuros eventos sísmicos.

2. Metodología

Este documento propone actualizar la información sobre la peligrosidad sísmica en Ecuador mediante una metodología cuantitativa de alcance explicativo y correlacional. La metodología emplea un enfoque probabilista para analizar cómo los cambios en los procesos de acumulación y liberación de energía en las fuentes sísmicas afectan la peligrosidad sísmica del país. Los resultados se expresan a través de valores del coeficiente Z, representados en un mapa y curvas de peligrosidad sísmica.

La investigación se centra en actualizar la peligrosidad sísmica en Ecuador a través del estudio de la sismicidad en el país. El universo de estudio abarca todos los sismos ocurridos en el territorio ecuatoriano, considerando un tamaño de muestra a convenir. Se selecciona la muestra de sismos desde 2011 hasta 2022 con magnitud momento mayor a 4.0, clasificados como sismos moderados. Los datos recopilados provienen de las bases de datos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) y del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

2.1. Materiales y métodos.

2.1.1. Fuentes sismogenicas

Para la modelación geométrica de las fuentes sísmicas se utilizaron las establecidas por el IG-EPN, donde se definen las fuentes sismogénicas basadas en el estudio realizado por [9], con un total de diecinueve fuentes sísmicas. Clasificándose en nueve fuentes corticales, cuatro fuentes interfase y seis fuentes intraplaca.

Las fuentes corticales son superficiales y están ubicadas en el centro y al oriente del país, mientras que las fuentes interfase están ubicadas en la costa ecuatoriana y están definidas en un rango medio de profundidad, por último, las fuentes intraplaca son las que alcanzan una mayor profundidad y están ubicadas en la zona centro del país. A continuación, se muestran las fuentes corticales (C), interfase (INF) e intraplaca (INT).

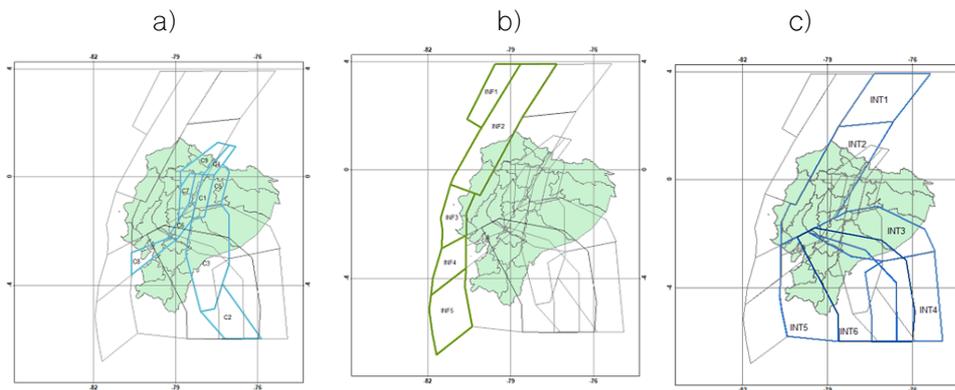


Figura 1. Fuentes sismogénicas a) corticales (C), b) interfase (INF) y c) intraplaca (INT).

2.1.2. Parámetros de fuentes

Se muestra un resumen de la información sísmica de cada fuente, en la que se detallan los valores necesarios para el cálculo probabilístico de la peligrosidad sísmica.

Tabla 1. Parámetros de sismicidad de las fuentes.

| Nombre fuente | Có d | Prof. Zona (km) | a | b | β | Ma g. Max | M 0 | Lamb da (M0) | sig ma β | Stri ke |
|-----------------|------|-----------------|------|------|---------|-----------|-----|--------------|----------------|---------|
| Corteza | | | | | | | | | | |
| COSANGA | C1 | 0-35 | 2.77 | 0.71 | 1.63 | 7.8 | 4.8 | 0.386 | 0.1 | 19 |
| MOYOBAMBA | C2 | 0-35 | 4.45 | 0.98 | 2.25 | 7.7 | 4.8 | 1.082 | 0.1 | 16 |
| CUTUCÚ | C3 | 0-35 | 5.44 | 1.17 | 2.69 | 7.8 | 4.5 | 1.436 | 0.1 | 19 |
| CHINGUAL | C4 | 0-35 | 3.08 | 0.98 | 2.25 | 7.6 | 4.2 | 0.046 | 0.1 | 35 |
| NAPO | C5 | 0-35 | 3.44 | 0.98 | 2.25 | 7.8 | 4.5 | 0.106 | 0.1 | 19 |
| PALLATANGA | C6 | 0-35 | 2.08 | 0.73 | 1.68 | 7.9 | 4.5 | 0.341 | 0.1 | 30 |
| QUITO-LATACUNGA | C7 | 0-35 | 2.68 | 0.07 | 1.61 | 7.3 | 4.5 | 0.336 | 0.1 | 19 |
| PUNA | C8 | 0-35 | 3.58 | 0.98 | 2.25 | 7.5 | 4.5 | 0.149 | 0.1 | 60 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------|----|---------|------|------|---------|-------|-----|-------|-----|----|
| EL ANGEL | C9 | 0-35 | 3-45 | 0-98 | 2.25-65 | 7.7-5 | 4-4 | 0.127 | 0.1 | 35 |
| Interfase | | | | | | | | | | |
| SHALLOW | F5 | 0-50 | 6-75 | 1-39 | 3.20-06 | 6.6-8 | 4-4 | 3.012 | 0.1 | 90 |
| ESMERALDAS | F2 | 0-50 | 4-81 | 0-51 | 1.86 | 8.8-8 | 4-4 | 2.341 | 0.1 | 30 |
| LA PLATA | F1 | 0-40 | 3-56 | 0-8 | 1.84-21 | 8-5 | 4-4 | 0.915 | 0.1 | 12 |
| GOLFO DE GUAYAQUIL | F4 | 0-40 | 3-48 | 0-84 | 1.93-42 | 8.2-5 | 4-4 | 0.492 | 0.1 | 0 |
| TALARA | F3 | 0-40 | 4-36 | 0-91 | 2.09-54 | 7.8-8 | 4-4 | 1.916 | 0.1 | 0 |
| Intraplaca | | | | | | | | | | |
| CALDAS CLUSTER | T1 | 35-250 | 4-71 | 1-05 | 2.41-77 | 7.2-8 | 4-4 | 0.987 | 0.1 | 90 |
| SUB VOLCANIC ARC | T2 | 35-180 | 5-07 | 1-11 | 2.55-59 | 7.2-5 | 4-4 | 1.141 | 0.1 | 80 |
| PUYO | T3 | 130-300 | 5-3 | 1-05 | 2.41-77 | 8-8 | 4-4 | 3.6 | 0.1 | 0 |
| LORETO | T4 | 130-180 | 7-38 | 1-62 | 3.73-02 | 8-8 | 4-4 | 1.279 | 0.1 | 5 |
| LOJA | T5 | 35-100 | 6-83 | 1-33 | 3.06-24 | 7.7-8 | 4-4 | 6.718 | 0.1 | 0 |
| MORONA | T6 | 0-35 | 4-54 | 1-04 | 2.39-47 | 7.5-8 | 4-4 | 2.958 | 0.1 | 5 |

2.1.3. Catálogo

Los datos del presente catálogo corresponden a los sismos registrados en los años 2011 al 2022, compilados del Instituto geofísico de la escuela politécnica nacional (IGEPN) y el servicio geológico de Estados Unidos (USGS). Los valores considerados para el catálogo fueron la latitud y longitud, profundidad, el valor y escala de la magnitud, fecha en el que se desarrolló cada evento sísmico.

El catálogo sísmico se ha desarrollado a partir del año 2011, porque se pretende analizar los sismos ocurridos en la última década tomando como base que el estudio de [9] referente a la definición de fuentes sísmicas no considera sismos de gran importancia como el terremoto del 16 de abril de 2016, con la finalidad de encontrar posibles cambios en la sismicidad del país que permitan identificar variaciones en las fuentes sísmicas.

El catálogo es representado como el mapa del Ecuador con los sismos analizados del IGEPN (rojo) y el USGS (azul).

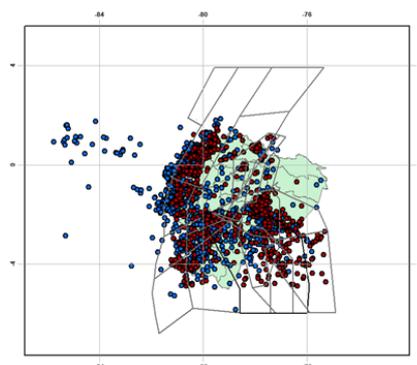


Figura 2. Sismos registrados en la última década.

2.1.4. Homogenización

En los catálogos analizados se tienen mediciones hechas por las instituciones IGEPN y USGS que están expresadas en varias escalas de magnitud, como son Magnitud de ondas de cuerpo (Mb), Magnitud de la agencia meteorológica de japon (Mjma), Magnitud local (ML), Magnitud local calculada en la componente vertical (MLv), Magnitud de ondas superficiales (Ms) y Magnitud de ondas superficiales de banda ancha Ms (BB). Por lo que es necesario transformar los valores de magnitud a una sola escala que nos permita homogenizar y simplificar el catálogo para entender de mejor manera la energía liberada en cada sismo.

2.1.5. Creación de subfuentes

Del catálogo homogenizado se procede a graficar los sismos con sus respectivas magnitudes y coordenadas en GIS, con el objetivo de analizar la distribución espacial de los sismos en el país.

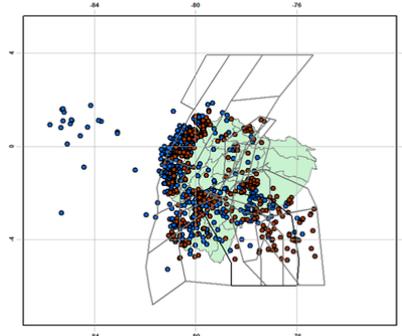


Figura 3. Sismos registrados a partir de la magnitud 4 Mw

Así se puede observar que en la zona de Manabí y Esmeraldas han ocurrido una gran cantidad de sismos, por lo que resulta pertinente crear dos subfuentes que engloben los dos cúmulos de sismos que se puede observar en dicha zona. La definición de estas subfuentes permitirá realizar un estudio más minucioso de la zona en cuestión.

Se crea la subfuente INFM1, la cual está ubicada en Manabí y en la que se han contabilizado un total de 153 sismos, también, se crea la subfuente INFM2, está ubicada entre Esmeraldas y Manabí en la cual se han contabilizado un total de 183 sismos.

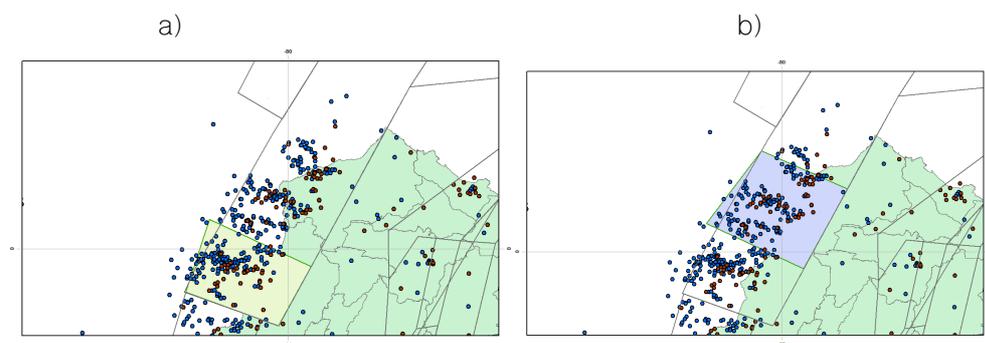


Figura 4. a) Subfuente INFM1 y b) Subfuente INFM2

2.1.6. Decluster del catálogo

Es necesario limpiar el catálogo sísmico de réplicas y premonitorios, por lo cual se empleó el algoritmo de Reasenberg para el decluster del mismo. Este algoritmo fue aplicado utilizando el programa Zmap en Matlab. Las variables consideradas en el software son las que se consideran estándar según [10].

Con la aplicación del método se consiguió reducir los catálogos para cada subfuente, en la fuente INF M1 el decluster del catálogo redujo el número de sismos de 153 a 105, dando a entender que los 48 sismos eliminados eran réplicas o premonitorios.

a)

b)



Figura 5. Catálogo sísmico a) sin declustering y b) con declustering de la Subfuente INFM1.

La fuente INF M2 el decluster del catálogo redujo el número de sismos de 183 a 114, dando a entender que los 69 sismos eliminados eran réplicas o premonitorios.

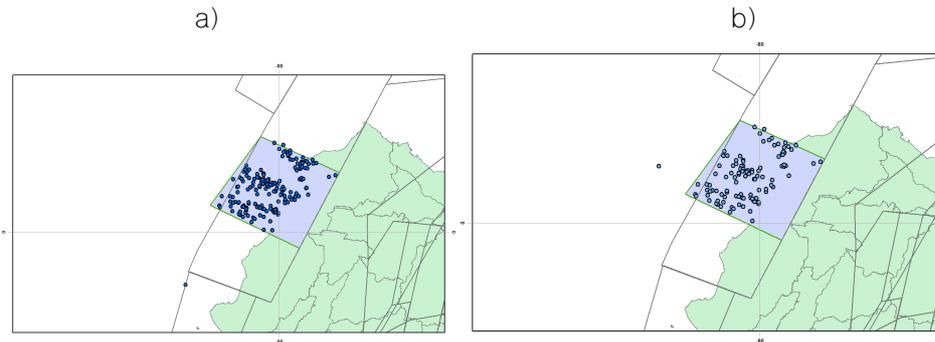


Figura 6. Catálogo sísmico a) sin declustering y b) con declustering de la Subfuente INFM2.

2.1.7. Gutenberg- Richter en subfuentes

A partir de los resultados obtenidos por la limpieza del catálogo se procede a definir el año de completitud de cada catálogo. El año de completitud es expresado como una pendiente constante en la gráfica que relaciona al número de sismos ocurridos a lo largo del período de estudio.

Se conoce que antes del año de completitud no se han registrado todos los sismos ocurridos en la zona de estudio debido a varios factores como la falta de equipos que registren todos los sismos por lo que se pretende corregir todos los años donde no existen dichas magnitudes. Por lo cual, en la completitud se define un año de referencia desde el cual se considera que la tasa de sismos es completa, la cual se extrapola a los años previos para obtener como resultado el número hipotético de sismos de cada magnitud ocurridos en todo el período.

2.1.8. FUENTE INFM1

En esta fuente se tiene un total de 105 sismos y el año de completitud es 2015 como se observa en la imagen.



Figura 7. Eventos sísmicos en el período de estudio

De esta manera se procede a calcular las tasas de sismos para cada magnitud Mw incluida en el catálogo. Este proceso se realiza para el catálogo original y para el corregido por completitud, es decir considerando el año en el cual los registros son completos para cada magnitud, y extrapolando para todo el período de estudio.

Se observa que la cantidad acumulada de sismos hipotéticos es de 149, la cual representa un aumento con respecto a los 105 sismos obtenidos del catálogo inicial, por lo que se puede decir que el catálogo ya ha sido completado.

El siguiente paso consiste en graficar las tablas anteriores relacionando la magnitud momento con el logN de los sismos acumulados en las tablas anteriores.

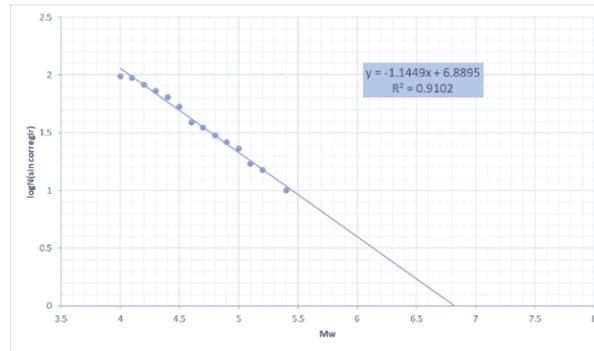


Figura 8. Gráfica Gutenberg-Richter para INFM1, corregido por completitud

Hallar la ecuación de la recta para estas gráficas nos permite obtener los valores a y b de la ecuación de Gutenberg-Richter

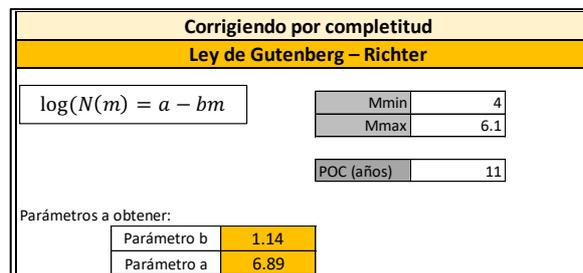


Figura 9. Resumen Gutenberg-Richter para INFM1

Para esta subfuente la ecuación de Gutember Richter queda expresada como

$$N(M) = 6.89x + 1.14$$

(1)

2.1.9. FUENTE INFM2

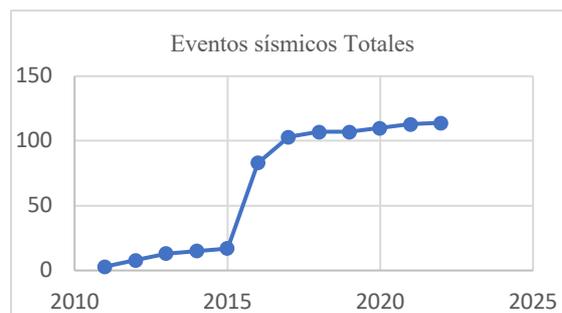


Figura 10. Eventos sísmicos en el período de estudio

Esta fuente cuenta con 114 sismos registrados en el período de observación y en la gráfica se observa que el año de completitud es 2015 el cual se entiende como un año de referencia que nos permite obtener una tasa de corrección que permite extrapolar todo el período en estudio.

La tasa corregida por completitud varía con respecto a la tasa sin corregir, en la mayoría de las magnitudes, lo cual significa que este proceso si nos permite corregir la cantidad de sismos que han existido en el período completo de estudio, como se observa en la siguiente tabla.

La cantidad acumulada de sismos hipotéticos es de 155, la cual representa un aumento con respecto a los 114 sismos obtenidos del catálogo inicial, por lo que se puede decir que el catálogo ya ha sido completado.

Graficando estos valores se obtienen los parámetros establecidos por Gutenberg Richter para esta fuente.

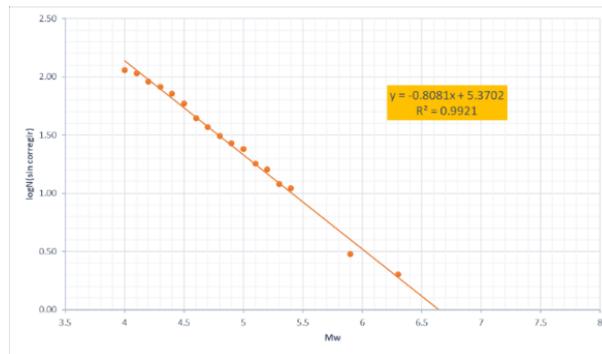


Figura 11. Gráfica Gutenberg-Richter para INFM2, corregido por completitud

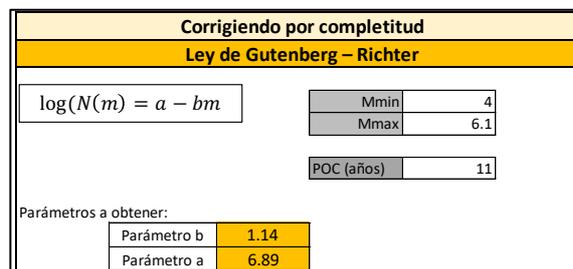


Figura 12. Resumen Gutenberg-Richter para INFM2

Para esta subfuente la ecuación de Gutenberg Richter queda expresada como

$$N(M) = 6.89x + 1.14$$

(2)

2.1.10. Modelación R-Crisis

Para el cálculo de peligrosidad sísmica en el software R-Crisis se debe realizar un procedimiento que considera el ingreso de algunos datos de entrada: mapa geográfico, fuentes sismogénicas y selección de modelos de atenuación.

Primeramente, se procede a ingresar el mapa geográfico del Ecuador para posterior a ello transportar las fuentes sismogénicas obtenidas del ArcGis, mismos archivos que fueron guardados en formato shapefile divididos según su régimen.

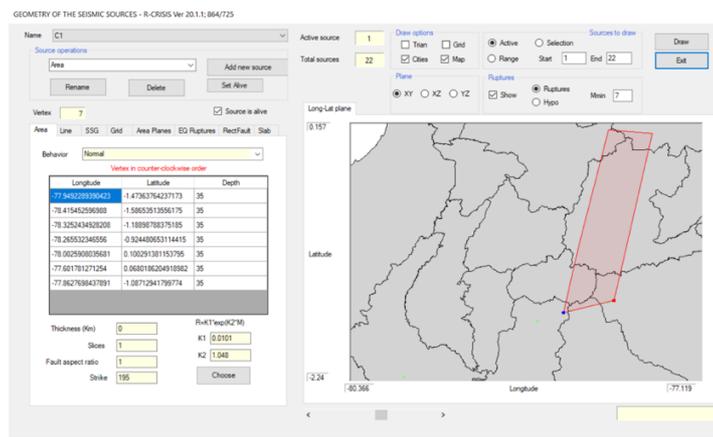


Figura 13. Ventana de ingreso de las fuentes sísmicas

Luego se procede a introducir los parámetros correspondientes a las fuentes sísmicas obtenidos aplicando la ley de Gutenberg–Richter como son la tasa de magnitud mínima M_0 , Parámetro esperado de b , coeficiente de variación de beta σ_b , también toma en cuenta el ingreso de las magnitudes máximas y mínimas registradas en cada fuente.

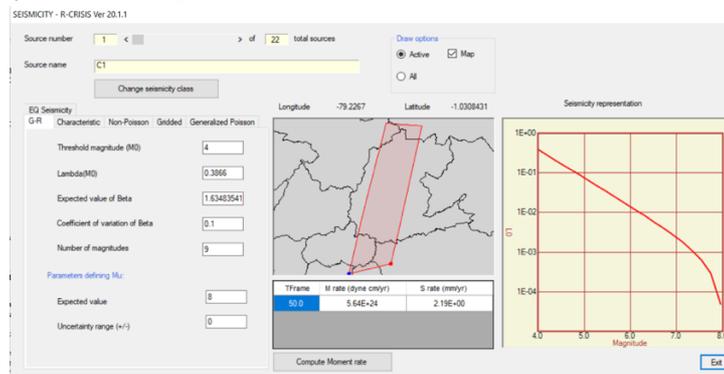


Figura 14. Ventana de introducción de datos de las fuentes sísmicas.

Los modelos de atenuación que se utilizaron fueron: Zhao (2006) para zonas corticales, Youngs et al., (1997) para zonas de interface e intraplaca.

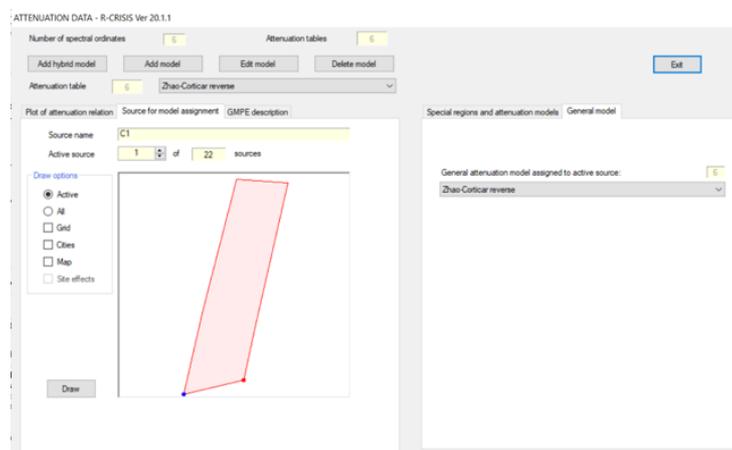


Figura 15. Ventana de introducción de datos de los Modelos de Atenuación.

Luego de haber ingresado todos los requerimientos en el Software R – CRISIS se procede a correr el programa para el cálculo de peligrosidad sísmica.

3. Resultados

3.1. Mapa de peligro sísmico

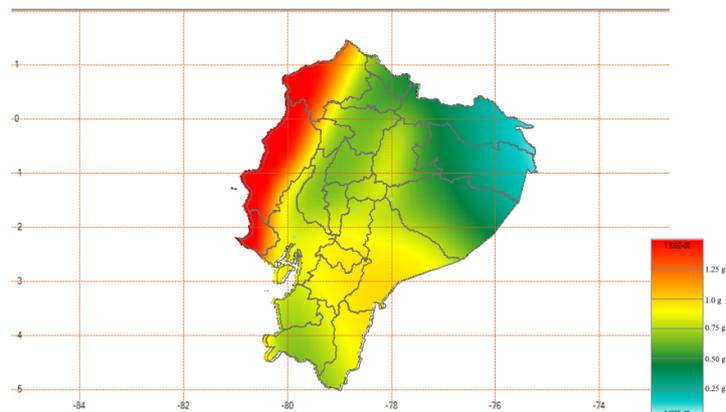


Figura 16. Mapa de peligro sísmico obtenido del R-Crisis.

El mapa obtenido muestra las aceleraciones de los movimientos sísmicos con un 10% de probabilidad de excedencia en un período de 50 años, es decir, un período de retorno de 475 años, esta probabilidad corresponde al sismo de diseño contemplado por la normativa ecuatoriana.

La distribución de colores, que representa la aceleración esperada, en el mapa obtenido a partir de R-CRISIS es similar al de la figura 17 y concuerda con la descripción del mapa de peligro sísmico presentado por [11] que indica que “Los mayores valores de PGA se presentan, en las zonas cercanas a la línea de costa ecuatoriana, especialmente en la Península de Santa Elena, Manabí y Esmeraldas. Se obtienen también valores altos en la región interandina y en el sureste del territorio continental ecuatoriano”. Para realizar la actualización del mapa de peligrosidad sísmica, se ha generado un catálogo sísmico a partir del cual se crearon 2 fuentes sísmicas INFM1 e INFM2 en la provincia de Esmeraldas y Manabí, sin embargo, en los resultados no se hace notorio un cambio en las aceleraciones con respecto a las demás zonas ubicadas en Costa del país.

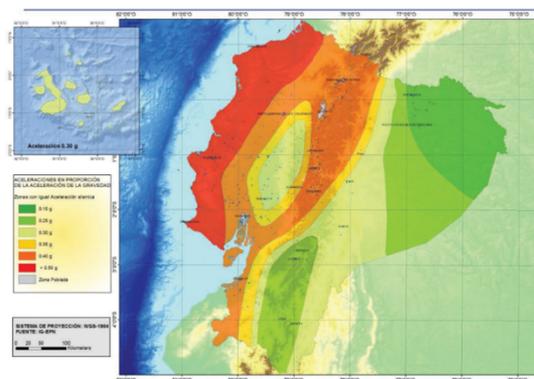


Figura 17. Mapa de Peligro Sísmico NEC-SE-DS

Observándose el valor máximo de $z=1.5g$ en la zona costera y un valor mínimo de $z=0.01$ en el nor-orient del país. Mientras que en la zona centro existen valores intermedios de la aceleración. Los valores de z definidos en la normativa para las ciudades capitales de las provincias de Guayas, Chimborazo y Pastaza son $0.5g$, $0.4g$ y $0.3g$ respectivamente. En este estudio, para las mismas ciudades los valores obtenidos de z son $0.84g$ en Guayaquil, $0.70g$ en Riobamba y $0.58g$ en Puyo.

Como se mencionaba anteriormente, las aceleraciones más altas con un periodo de retorno de 475 años se encuentran en el Noroccidente del Ecuador y según el mapa de peligrosidad sísmica alcanzan aceleraciones de hasta $1.5g$ en la costa. En el trabajo de investigación de [12]

realiza una reevaluación de amenaza sísmica por el método probabilista de un periodo de retorno de 475 años para la ciudad de Portoviejo donde se obtuvo aceleraciones máximas de 1.5g mismo que concuerdan con los resultados obtenidos por el software R-Crisis. Asimismo, (IG-EPN, 2016) en un informe especial sobre el sismo del 16 de abril del 2016, indica que en la estación APED de la red de sismógrafos del país se registró una aceleración de 1.407 g. Dando a conocer que las aceleraciones en la costa del país pueden alcanzar valores similares a los calculados.

Sin embargo, al comparar con la norma ecuatoriana de la construcción se tiene una aceleración de 0.5g siendo así un valor inferior al obtenido. Según la NEC-15 en la sección 10.1 referente al riesgo sísmico, reconoce que los valores de aceleración para la zona VI son mayores a 0.5g sin embargo para que las construcciones de las edificaciones sean más económicas se ha saturado a dicho valor.

3.2. Curvas de peligro sísmico

En la figura 18 se muestran las curvas de peligrosidad sísmica donde se pueden observar las aceleraciones de cada ciudad, con base a la tasa de excedencia que se requiera analizar. El estudio evalúa la peligrosidad para el sismo de diseño, con un periodo de retorno de 475 años, que corresponde a una tasa de excedencia de 10% en 50 años.

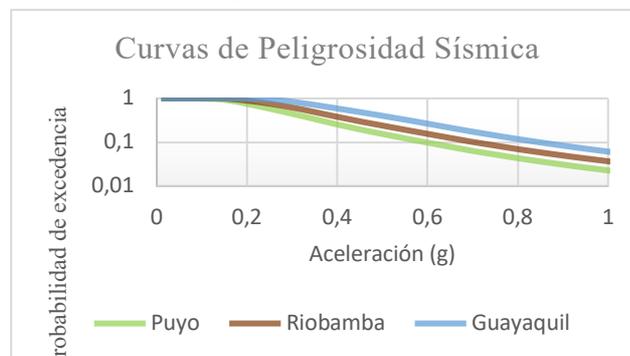


Figura 18. Curvas de peligro sísmico de las ciudades de Guayas, Riobamba y Puyo

En el caso de tener una tasa anual de excedencia de 0.1, las aceleraciones aproximadas en las ciudades de Guayaquil, Riobamba y Puyo serán de 0.84g, 0.70g y 0.59g, respectivamente. Mismos que concuerdan con los resultados obtenidos en el mapa de peligrosidad sísmica.

Al comparar los tres resultados, se puede notar cómo la subducción de las placas de Nazca y Sudamericana afecta especialmente al litoral ecuatoriano, debido a que allí se obtiene las más altas aceleraciones y por ende la sismicidad es más alta, esto explica los sismos recurrentes y de alta magnitud de esta zona.

A continuación, se presenta las curvas de peligro sísmico, donde se muestra la probabilidad de excedencia vs la aceleración para periodos de PGA, 0.1s, 0.2s, 0.5s y 1s ($S_a(g)$) de la ciudad de Guayaquil, Riobamba y Puyo, también se tiene las curvas de peligrosidad sísmica según lo establecido por la norma ecuatoriana de la construcción.

En las curvas de peligro sísmico observadas en la figura 19, se da a notar claramente que las aceleraciones para cada tasa anual de excedencia son mayores a los establecidos por la NEC-15.

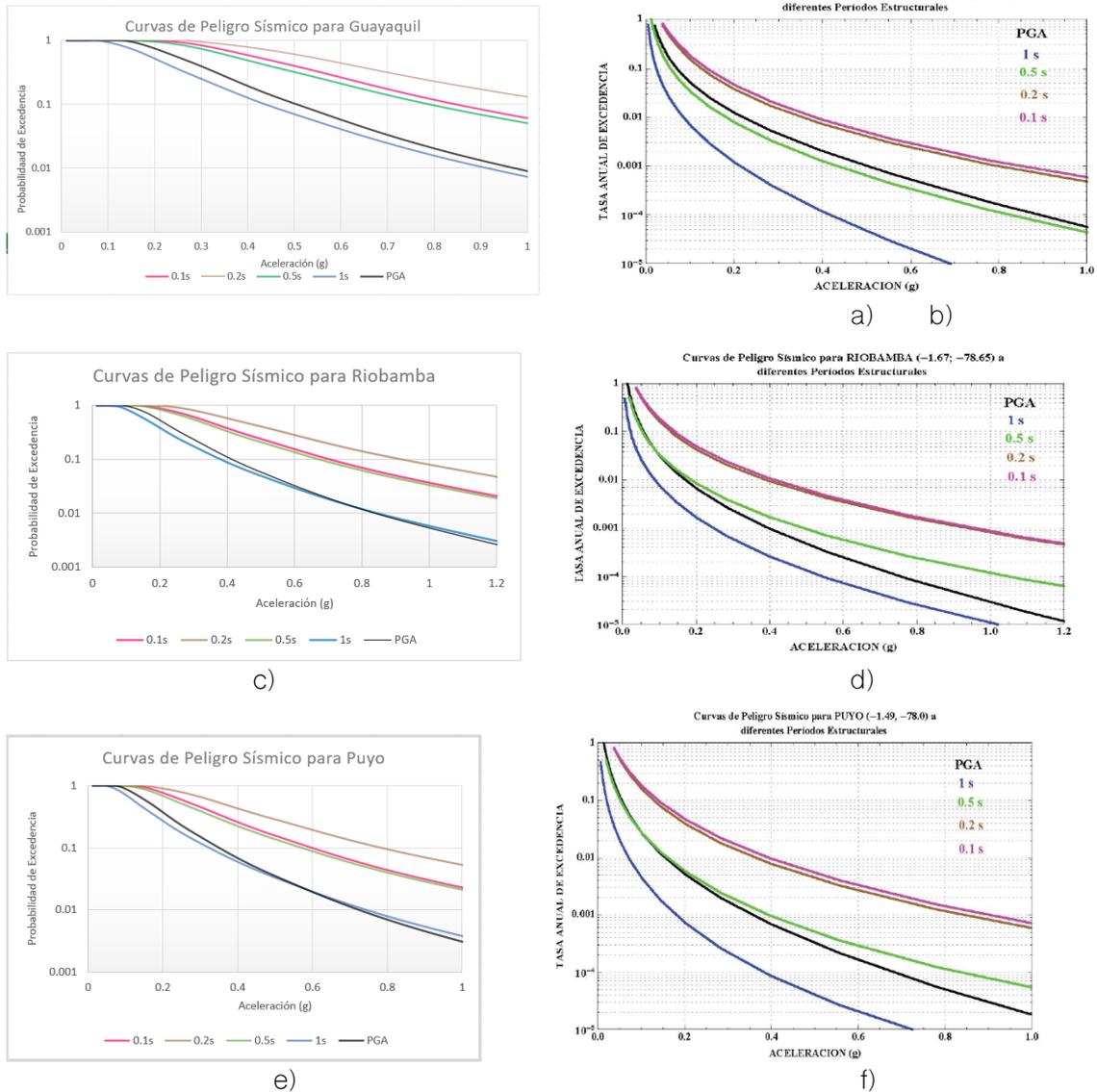


Figura 19. Comparación de las curvas de peligrosidad sísmica según los resultados obtenidos en R-Crisis (izquierda) vs las establecidas por la NEC-15 (derecha), de las ciudades de Guayaquil, Riobamba y Puyo.

Las figuras 19 a, c y e, muestran las curvas de peligrosidad obtenidas en R-CRISIS, donde el eje de las ordenadas representa la probabilidad de excedencia. Para el sismo de diseño, al que corresponde una probabilidad de excedencia del 10% y un período de retorno $T_r = 475$ años, se evalúa la aceleración pico del suelo PGA, correspondiente a un período de 0 s. Obteniendo las siguientes aceleraciones, en Guayaquil de 0.5g, en Riobamba de 0.41g y en Puyo de 0.36g.

Además, se muestran las curvas de peligrosidad establecidas en la NEC-15, las cuales son representadas en las figuras 19 b, d y f. Estas curvas reflejan la tasa anual de excedencia ($1/T_r$) en el eje de las ordenadas, lo que permite evaluar el valor del PGA correspondiente al sismo de diseño cuando la tasa es de 0.00211. Según la información presentada, se observa que las aceleraciones correspondientes a Guayaquil, Riobamba y Puyo son de 0.41g, 0.32g y 0.28g, respectivamente. Estos valores, utilizados para el cálculo del espectro de diseño son menores a las aceleraciones obtenidas, sin embargo, ya se preveía un incremento en las aceleraciones actuales.

Por ello se puede evidenciar que las aceleraciones actuales son considerablemente altas en contraste con las establecidas por la norma, esto puede ser debido a la falta de actualización de datos, ya que en la norma ecuatoriana de la construcción en la sección 10.1 menciona que los estudios de peligro sísmico han sido actualizados hasta el año 2011.

3.3. Modelos de atenuación utilizados

Los modelos de atenuación (GMPes) utilizados para el cálculo de peligrosidad sísmica son los recomendados en la investigación realizada por [13] donde analiza y evalúa la compatibilidad de las ecuaciones con respecto al tipo de falla, magnitudes, tipo de suelo. Cabe mencionar que en Ecuador no existe la elaboración de modelos de atenuación con las condiciones exactas de nuestro país, sin embargo, se puede seleccionar los modelos de atenuación que mejor se acoplen al país. Según [14] la correcta selección de modelos de atenuación es fundamental para predecir el valor de un determinado parámetro del movimiento, como es la aceleración.

En el presente estudio se usó el modelo de Zhao (2006) para fuentes corticales, debido a que es un modelo propuesto para zonas de subducción y zonas de corteza superficial ya sean de corticales o corticales inversos, tomando en cuenta las principales características del modelo: válido para sismos en un rango de magnitud de 5–8.3 (Mw), para un periodo espectral de 0–5 (s), distancia aplicable de 0 a 300 (Km). También se utilizó el modelo de Youngs *et al.*, (1997) para zonas de interface e intraplaca, sus principales características son: válido para sismos en un rango de magnitud de 5–8.5 (Mw), para un periodo espectral de 0–5 (s), distancia aplicable de 10 a 500 (Km).

3.4. Espectros de Peligro sísmico uniforme (EPU)

A continuación, se muestran los resultados de los espectros de peligro uniforme para los niveles de amenaza sísmica contemplados en la normativa ecuatoriana. Estos niveles de amenaza son menor, moderado, severo y extremo y sus períodos de retorno son 72, 225, 475 y 2500 años, respectivamente.

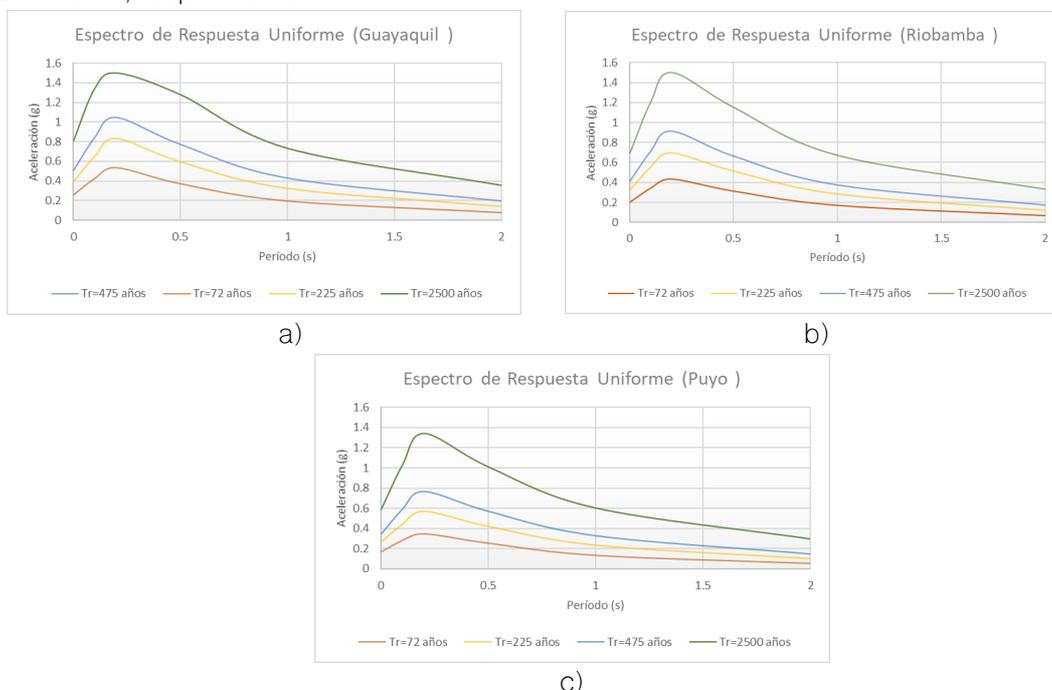


Figura 20. Espectros de respuesta uniforme de las ciudades de Guayaquil, Riobamba y Puyo. Estos espectros muestran las aceleraciones en función del período que puede tener cada nivel de amenaza, y suelen ser utilizados para la verificación de desempeño de estructuras

especiales. Para las ciudades analizadas se tiene que la máxima aceleración para el sismo de diseño ($T_r=475$ años) es 1.05g, 0.92g y 0.77g para Guayaquil, Riobamba y Puyo, respectivamente. Mientras que para el sismo extremo ($T_r=2500$ años), el cuál es usado en el diseño de estructuras especiales para impedir el colapso de la estructura, los valores obtenidos para las aceleraciones son: en Guayaquil 1.5g, en Riobamba 1.5g y en Puyo 1.34g.

3.5. Riesgo sísmico

En Guayaquil, (Tacuri, 2019) aplica el Índice de Priorización de Edificios para la Gestión del Riesgo Sísmico – FUNVISIS, el cual evalúa parámetros estructurales tales como tipología estructural, irregularidad, adosamiento, antigüedad y grado de deterioro, para determinar la vulnerabilidad de 50 edificaciones de mediana altura de la ciudad, así obtiene que 90% de ellas son de vulnerabilidad elevada, 8% vulnerabilidad media alta y 2% con vulnerabilidad media baja. Asimismo, [15] aplican un método de ponderación y puntaje de parámetros estructurales como el sistema resistente, posición del edificio, configuración en planta, regularidad vertical y daño existente, para la evaluación de la vulnerabilidad de 106 viviendas en el barrio Bastión Popular e indican que 11% tienen vulnerabilidad baja, 68% es de vulnerabilidad media y 21% presenta elevada vulnerabilidad. Considerando que el valor z en esta ciudad es 0.84g, se entiende que el riesgo es alto ya que se puede tener grandes aceleraciones en edificaciones que pueden afectar a la mayoría de las edificaciones ya que estas presentan una vulnerabilidad media a alta.

En Riobamba, [16] aplica el método italiano, el cual evalúa parámetros estructurales, tales como la organización y calidad del sistema resistente, posición, configuración en planta y elevación, elementos estructurales y estado de conservación. Así determina la vulnerabilidad 12 edificios de la ciudad, de los cuales 83% son calificados con vulnerabilidad media y 17 % con vulnerabilidad alta. Asimismo, [17] evalúan, aplicando el método italiano, 221 viviendas del barrio 24 de Mayo, de las cuales un 67.46% tienen vulnerabilidad media, 0.97% tienen vulnerabilidad alta y 10.68% presentan vulnerabilidad baja. Considerando que el valor de z en esta ciudad es de 0.7g se entiende que el riesgo es medio, ya que tanto la peligrosidad como la vulnerabilidad presentan valores intermedios.

En Pastaza, los datos referentes a vulnerabilidad son nulos, sin embargo, se puede observar en las referencias antes mencionadas que existe un patrón en la vulnerabilidad de las construcciones en el país. Este patrón muestra que el mayor porcentaje de edificios y viviendas presentan una vulnerabilidad media y elevada. El valor de z para esta provincia ha sido calculado como 0.58g, por lo que se puede inferir que al tener una peligrosidad intermedia y que la vulnerabilidad en el país es generalmente media también, el riesgo sísmico es medio.

Adicionalmente, se puede considerar la exposición de cada capital de provincia en función de la densidad poblacional según el censo poblacional del 2010, estos valores en Riobamba 230.81 hab/km², en Guayaquil 682.41 hab/km² y en Puyo 3.14 hab/km². En los resultados del mencionado censo también se expone el tipo de vivienda que existe en cada provincia, en Guayas el 74% de las viviendas son casas, mientras que el 12.3% comprende ranchos, mediaguas, covachas y chozas. En Chimborazo el 73.7% son casas, mientras que el 23.1% está repartido entre mediaguas, chozas, covachas y ranchos. En Pastaza el 64.1% de las viviendas son casas, y el 20.7% comprende ranchos, mediaguas, chozas y covachas.

En la investigación de [18] se mide el nivel socioeconómico de los hogares urbanos y rurales en todo el país, basándose en criterios de consumo como: el ingreso, la educación y la etnia, mediante una encuesta realizada por la INEC. Según los resultados obtenidos, en todas las provincias del Ecuador predomina el nivel socioeconómico medio alto con un 74.05%, 48.48% y 63.39% en Guayas, Chimborazo y Pastaza respectivamente. Sin embargo, el nivel medio alto

es excluido por su alta representatividad y se obtiene en Guayas un nivel de consumo medio bajo del 10.11%, en Chimborazo un nivel bajo del 28.66% y en Pastaza un nivel bajo del 11.9%.

Nótese que en Chimborazo la exposición es mayor, debido a que su densidad poblacional es media y que el 23.1% de viviendas son chozas o mediaguas que deben ser construidos sin cumplir con criterios técnicos, además se indica que un 28.66% de la población tiene un nivel de consumo bajo, resultando en una exposición alta para esta provincia. En Pastaza se observa una baja densidad poblacional, pero el 20.7% de las viviendas pueden ser el resultado de la construcción informal, además se muestra que el 11.9% de la población tiene un consumo bajo, lo cual indica un nivel de exposición bajo en la provincia. Finalmente, en Guayas, la densidad poblacional es alta, el 12.3% de viviendas puede ser baja calidad y el 10.11% de la población está en un consumo medio bajo, resultando en una exposición alta para esta provincia.

Tabla 2. Tabla de resumen de la vulnerabilidad en las capitales de las provincias de Guayas, Chimborazo y Pastaza.

| Ciudad | Muestra | Tipo de Construcción | Porcentaje | Vulnerabilidad |
|-----------|---|------------------------------------|------------|----------------|
| Guayaquil | 50 | Edificios de mediana altura | 90% | Alta |
| | | | 8% | Media-Alta |
| | | | 2% | Media-Baja |
| | 106 | Viviendas populares de baja altura | 21% | Alta |
| | | | 60% | Media |
| | | | 11% | Baja |
| Riobamba | 12 | Edificios de mediana altura | 17% | Alta |
| | | | 83% | Media |
| | | | 0% | Baja |
| | 221 | Viviendas populares de baja altura | 0.97% | Alta |
| | | | 67.46% | Media |
| | | | 10.68% | Baja |
| Puyo | No hay estudios relacionados al tipo de edificación, la vulnerabilidad se presenta por los sistemas constructivos similares a los anteriores. | | | |

Se resume el riesgo sísmico en la tabla 13, considerando su ecuación

Tabla 3. Resumen Riesgo Sísmico

| | Peligrosidad | Vulnerabilidad | Exposición | Riesgo |
|-----------|--------------|----------------|------------|--------------|
| Guayaquil | Alta | Media | Alta | Alto |
| Riobamba | Media | Media | Alta | Medio -Alto |
| Puyo | Media | Media | Baja | Medio - Bajo |

4. Conclusión

Las fuentes sismogénicas con mayor incidencia en la peligrosidad sísmica son las fuentes de interfase, puesto que están ubicadas en la costa, donde se tiene los valores de aceleración más altos en el país. Confirmando así que la subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana tiene la mayor incidencia en la sismicidad del Ecuador. Los modelos de atenuación de Zhao y Young

se ajustan a las características sísmicas del país, ya que, siendo aplicados en el modelo de peligro sísmico, este arroja resultados verosímiles y coherentes con lo definido en la normativa.

El mapa de peligro sísmico obtenido de la modelación en R-Crisis presenta similaridad en la distribución de los valores de aceleración definidos en la NEC-15, esto a pesar de que los valores de las aceleraciones calculadas con un 10% de probabilidad de excedencia en un período de 50 años, es decir, un período de retorno de 475 años, son: 0.84g en Guayaquil, 0.70g en Riobamba y 0.58g en Puyo. Siendo estos mayores que los contemplados en la norma de: 0.5g, 0.4g y 0.3g respectivamente.

De igual manera se aprecia que en las curvas de peligro sísmico las aceleraciones calculadas son: en Guayaquil de 0.5g, en Riobamba de 0.41g y en Puyo de 0.36g, y al compararlos con la normativa: 0.41g, 0.32g y 0.28g respectivamente, se obtienen que las aceleraciones actuales son mayores. Mostrando así una evidencia de que la peligrosidad sísmica definida en la norma puede estar subestimada en relación con la sismicidad actualizada del país.

El riesgo en el país está principalmente definido por la peligrosidad sísmica, puesto que es en este parámetro en el que se observa mayor variación cuando se evalúa cada ciudad. Que la vulnerabilidad en el país sea mayoritariamente media con tendencia a alta, evidencia que la calidad de las construcciones puede no ser tan tecnificada y que las ciudades con mayor riesgo son aquellas en las que el valor de z es elevado, considerar el aspecto socioeconómico de la sociedad a través del análisis de exposición nos da una idea de que, aunque la vulnerabilidad sea media, el riesgo puede ser alto debido a los altos porcentajes de pobreza y de viviendas no tecnificadas.

Financiamiento: La investigación no fue financiada por ninguna entidad.

Conflictos de interés: Los autores declaran la no existencia de conflicto de interés alguno.

Referencias

1. de Carvalho Jr, I.J.; Muñoz, J.M.S. Análisis de La Amenaza Sísmica En Nicaragua: El Caso de La Ciudad de Managua. *Investig. Geográficas* **2016**, 121–138.
2. Cesen Urresta, I.E. Estudio Del Peligro Sísmico Determinista Para Las Estructuras de Ambato Sector San Vicente de Pishilata Entre Las Calles Benjamín Franklin, Ramón y Cajal, Tomas Edison y Albert Einstein 2022.
3. Freeman, P.K.; Martin, L.A.; Linnerooth-Bayer, J.; Warner, K.; Pflug, G. Gestión de Riesgo de Desastres Naturales. *Banco Interam. Desarro. Desarro. (BID). sfsi* **2009**.
4. Quinde Martínez, P.; Reinoso Angulo, E. Estudio de Peligro Sísmico de Ecuador y Propuesta de Espectros de Diseño Para La Ciudad de Cuenca. *Ing. sísmica* **2016**, 1–26.
5. Moncca Anculle, G. Cálculo Del Momento Sísmico Mediante La Función Temporal de La Fuente Sísmica y Su Aplicación a Sismos Profundos. **2010**.
6. Lagos Garcia, S.S. Efecto Del Riesgo Sísmico En El Diseño de Edificaciones Informales Del AH Los Pinos, Callao-2021. **2022**.
7. Bernardo Jaimes, I.B.; Ramírez Laurente, R.J. Aplicación y Análisis de Un Modelo Dinámico Con Interacción Suelo-Estructura (ISE) Para Cimentaciones Con Pilotes de La Sede Central Del Gobierno En La Ciudad de Pucallpa-Ucayali. **2022**.
8. Mayorga Ases, L.A. Evaluación de Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones de Estructuras Metálicas En La Parroquia La Matriz, Ambato, Ecuador: Propuesta de Reforzamiento Estructural de Una Edificación Representativa 2023.

9. Yepes, H.; Audin, L.; Alvarado, A.; Beauval, C.; Aguilar, J.; Font, Y.; Cotton, F. A New View for the Geodynamics of Ecuador: Implication in Seismogenic Source Definition and Seismic Hazard Assessment. *Tectonics* **2016**, *35*, 1249–1279.
10. Amini, H. Comparing Reasenberg and Gruenthal Declustering Methods for North of Iran. In Proceedings of the Second European conference on earthquake engineering and seismology; 2014.
11. Parra Cárdenas, H.A. 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 2015.
12. Aguilar-Manzo, J.; García-Vinces, L.J.; Zevallos-Loor, M.G. Reevaluación de La Amenaza Sísmica Para El Cantón Portoviejo (Provincia de Manabí, Ecuador: Una Comparación de Métodos Determinístico y Probabilístico). *Polo del Conoc.* **2021**, *6*, 504–526.
13. Cañizares Ortega, F.F. Selección de Ecuaciones de Atenuación (GMPE's) Compatibles Con El Sistema de Fallas de Quito 2017.
14. Ortiz Panchi, O.C. Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica En Ecuador. 2013.
15. Loja Suárez, W.X.; González López, J.A.; Rojas Cruz, P. Vulnerabilidad Sísmica de Viviendas Populares Asentadas En Cerros y En El Sur de La Ciudad de Guayaquil 2019.
16. Calderón Flores, D.R.; Cáceres Santacruz, A.S. " Vulnerabilidad Sísmica En Edificios de La Ciudad de Riobamba". 2018.
17. Mita Tixi, M.L.; Alvarado Uvidia, N.V. Determinación Del Índice de Vulnerabilidad Sísmica de Las Viviendas Existentes En El Barrio 24 de Mayo de La Ciudad de Riobamba 2014.
18. Murillo, F.J.; Martínez-Garrido, C. Segregación Escolar Por Nivel Socioeconómico En Ecuador y Sus Provincias. **2017**.



© 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>