

**Determination of the velocity of the shear wave and the period of the soil,
by measurements of geophysical tests and triaxial accelerometers.**

**Determinación de la velocidad de la onda de corte y el periodo del suelo,
mediante ensayos geofísicos y acelerómetros triaxiales.**

Autores:

Ortiz Abril, Claudia Alexandra
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Maestrante
Cuenca – Ecuador



cortiza@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-0341-5466>

Ing. Maldonado Noboa, César Humberto, Mgs.
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Docente
Cuenca – Ecuador



cmaldonadon@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-0383-5460>

Ing. Maldonado Noboa, Juan Sebastián, Mst.
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Docente
Cuenca – Ecuador



jmaldonadon@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

Citación/como citar este artículo: Ortiz A., C., Maldonado N., C. y Maldonado N., J. (2023). Determinación de la velocidad de la onda de corte y el periodo del suelo, mediante ensayos geofísicos y acelerómetros triaxiales. MQRInvestigar, 7(1), 2227-2249. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.1.2023.2227-2249>

Fechas de recepción: 02-FEB-2023 aceptación: 25-FEB-2023 publicación: 15-MAR-2023



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>

Resumen

El peligro sísmico permite caracterizar el comportamiento que presentará el terreno sobre el cual se asienta una determinada estructura al momento de presentarse un movimiento telúrico; sin embargo, los márgenes de incertidumbre al momento de predecir intensidades máximas, contenidos de frecuencia, entre otras características, son muy elevados; afectando de manera considerable la comprensión entre las repuestas esperadas de la estructura y los valores que han sido supuestos durante el proceso de diseño estructural.

Es por ello que, el diseño sismorresistente, presenta principios que mediante la presunción de parámetros como las velocidades de onda de corte y el periodo del suelo, sumados a los indicados en la normativa, permiten generar modelos y diseños estructurales ajustados a las condiciones sobre las cuales descansará la estructura, considerando los efectos de sitio que la zona pudiese presentar.

El presente artículo determina los periodos del suelo y la velocidad de la onda de corte en diferentes puntos del cantón Cuenca, partiendo de un análisis comparativo entre el ensayo geofísico MASW y el ensayo de vibración forzada mediante un acelerómetro RASPBERRY SHAKE; en donde, los resultados obtenidos, fueron muy aproximados entre sí, concluyendo que, para la rama del diseño estructural, los datos obtenidos con el acelerómetro mediante el ensayo de vibración forzada son suficientes para contar con diseños estructurales adecuados.

Palabras claves: Periodo del suelo; Velocidad onda de corte; Ingeniería sísmica; Diseño sismorresistente.

Abstract

The seismic hazard allows characterizing the behavior that the soil on which a certain structure sits will present, at the time of a telluric movement; however, the uncertainty margins when predicting maximum intensities, frequency contents, among other characteristics, are very high; considerably affecting the understanding between the expected responses of the structure and the values that have been assumed during the structural design process.

That is why, the earthquake-resistant design, has criteria that, through the assumption of parameters such as shear wave speeds and the period of the soil, added to those indicated in the regulations, allow generating models and structural designs adjusted to the conditions on which the structure will rest, considering the site effects that the area could present.

This article determines the periods of the soil and the velocity of the shear wave in different points of the Cuenca parish, based on a comparative analysis between the MASW geophysical test and the forced vibration test using a RASPBERRY SHAKE accelerometer; where the results obtained were very close to each other, concluding that, for the area of structural design, the data obtained with the accelerometer through the forced vibration test are enough to have adequate structural designs.

Keywords: Soil period; Shear wave velocity; Earthquake engineering; Earthquake-resistant design.

Introducción

El nivel de demanda sísmica debe encontrarse asociado a un nivel de desempeño de la estructura, esto, con el objetivo de controlar los daños ante un sismo. Debido a la gran incertidumbre existente respecto a predecir duraciones, magnitudes, y demás parámetros necesarios al momento de realizar un diseño sismorresistente, es indispensable la realización de ensayos que permitan contar con la mayor cantidad de información posible, para realizar un diseño estructural sismorresistente óptimo, considerando todos los efectos de sitio de la zona de emplazamiento de la estructura en diseño. Es por esto que, ante esta falta de seguridad, se utiliza análisis probabilista para determinar la amenaza sísmica, con el propósito de modelar y analizar el movimiento del suelo durante un sismo dentro de un área de interés.

El diseño sismorresistente cuenta con criterios que se basan en procesos probabilísticos que permiten presumir intensidades y frecuencias de ocurrencia de un sismo. Existen varias maneras de ilustrar los resultados del análisis probabilista de amenaza sísmica, estas son: curvas de peligro sísmico, espectros de peligro uniforme o incluso mapas de amenaza sísmica en donde se muestran valores de aceleraciones máximas probables para los diferentes periodos de retorno. En consecuencia, a partir de esto, puede determinarse un sismo de diseño que podrá ser plasmado dentro de una norma de construcción. A más de estos datos, podrán realizarse ensayos geofísicos o ensayos de vibración forzada, que permitan la generación de información de consideración al momento de realizar el diseño estructural de un edificio, y esta es, y esta es, la consideración de los efectos de sitio; información de suma importancia y que la normativa nacional vigente, no considera.

Ecuador está localizado en el cinturón de fuego del Pacífico, y por ende, está afectado por una intensa actividad sísmica, causada por la placa oceánica Nazca al ingresar debajo de la placa continental Sudamericana, además de presentar numerosos y complejos sistemas de fallas activas locales a lo largo de todo su territorio. Ecuador, ha experimentado el poder destructivo de los sismos, el evento de mayor magnitud fue registrado en 1906, con una magnitud estimada de Mw 8.8, y su epicentro tuvo lugar en la costa del país. Por otra parte, en la región andina, han ocurrido eventos superficiales, que a pesar de ser de menor magnitud, han ocasionado la pérdida de muchas vidas y daño material, pues el epicentro se localizó cerca de grandes ciudades. El último sismo catastrófico, sucedió el 16 de abril de 2016, en Pedernales, donde su epicentro tuvo lugar en la zona de subducción y su magnitud fue de Mw 7.7; su impacto sobre en la provincia de Esmeraldas fue grande.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC – 15, en su capítulo de Peligro Sísmico, proporciona un mapa de zonificación sísmica para el Ecuador, en el cual se determina la amenaza sísmica de posibles efectos que pueden provocar un sismo raro, periodo de retorno

de 475 años, en diferentes zonas en las cuales se ha subdividido al país, indicando un porcentaje en función de la aceleración de la gravedad (Z) que estima la aceleración probable del suelo en roca. Sin embargo, es importante analizar zonas de mayor riesgo debido a efectos de sitio que presenta el suelo, debiendo por lo tanto realizar estudios en menor escala, a nivel de provincia, ciudades, parroquias o comunidades, que permita la consideración de efectos de sitio y determine aceleraciones que registra el suelo del sitio en análisis, permitiendo obtener datos que ayuden a los profesionales a la toma de decisión al momento del diseño y construcción.

Existen varios tipos de sismos que ocurren dentro del territorio nacional, entre ellos podemos encontrar, sismos de magnitudes considerables a profundidades de 30 – 50 km, sismos de fallas transcurrentes que presentan profundidades de aproximadamente 10 km; y finalmente, pero no menos importantes, los sismos superficiales producto de fallas locales activas. Si los epicentros de estos sismos se encuentran debajo o cerca de centros urbanos, pueden ocasionar pérdidas humanas y materiales, además, de generar cuantiosos daños en las infraestructuras existentes. Los daños que estos sismos producen sobre las estructuras, están relacionados con la respuesta sísmica del terreno frente a las ondas sísmicas, ya que estas sufren modificaciones debido a las condiciones geológicas, topográficas y de efectos de sitio.

En la norma ecuatoriana de la construcción NEC – 15 se encuentra como sugerencia que para poblaciones con un número mayor a 100.000 habitantes se debería disponer de estudios de microzonificación sísmica y geotécnica, mientras que para sitios en donde el suelo sea tipo F, se deberá realizar un espectro de respuesta elástico de aceleraciones específico. Sin embargo, Cuenca no dispone de un mapa de microzonificación sísmica, a pesar del requerimiento que indica la norma; a nivel nacional se han realizado estudios similares en Quito, Guayaquil, Ambato, Esmeraldas y Pedernales; pero ninguno específico para la zona 6. Si bien es cierto, en la ciudad de Cuenca se han realizado varios estudios en relación al peligro sísmico, sin embargo, ninguno de ellos se sustenta en ensayos realizados en fallas activas de la zona, sino por el contrario es el análisis de datos recopilados de registros de eventos telúricos que se han presentado a lo largo de los años en la ciudad, la mayoría de ellos con epicentros lejanos, y sin considerar los efectos de sitio.

El austro ecuatoriano se encuentra expuesto a una serie de fenómenos naturales, particularmente en zonas de asentamientos poblacionales, laderas, zonas de volcanes activos, áreas de fallas geológicas, estratos de suelos blandos, terrenos inestables, etc. Estos fenómenos modifican la respuesta estructural ante una aceleración presentada en la base, poniendo en peligro no solo las infraestructuras construidas, sino por el contrario, lo más importante, vidas humanas. A lo largo de los años, se ha observado que en el Ecuador gran parte de los daños están asociados a esta amenaza, mismos que se producen debido a la reactivación de deslizamientos antiguos que no han sido estudiados ni inventariados, por lo

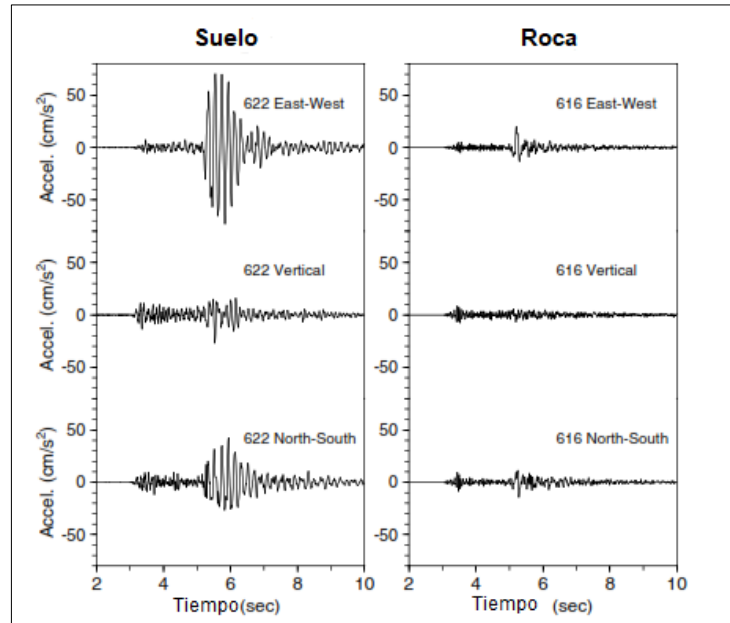
tanto, no conciben soluciones técnicas adecuadas al momento de la construcción de obras sobre estos sitios.

La cuantificación de la amplificación de las ondas sísmicas a través de los estratos del suelo, permite determinar un sismo de diseño adecuado para la zona, optimizando el diseño de estructuras resilientes, resistentes, económicas y seguras. Al ser Cuenca una ciudad amplia en cuanto a su gama geomorfológica, faculta a la existencia de zonas vulnerables en cuanto a movimiento de masas de suelo, siendo éstas, zonas de expansión urbana y rural en su mayoría. El no contar en el pasado con tecnología adecuada, ha impedido el conocer de mejor manera el comportamiento de los suelos en estas zonas; no es hasta ahora que se cuenta con herramientas computacionales y software adecuado, que es posible plantear investigaciones que permitan la toma adecuada de decisiones, al momento de concebir estructuras en estas zonas.

Con el objetivo de deducir el peligro sísmico en un punto específico del territorio, es importante analizar de manera conjunta el peligro sísmico local y el de toda la región. Para la determinación de la peligrosidad de la región, es necesario estimar el movimiento del suelo causado por el mayor sismo de la región, considerando un escenario determinista; por el contrario, si se considera un escenario probabilista, se determina diferentes valores del movimiento del suelo asociados a varios niveles de probabilidad. Por su parte, el peligro sísmico local, considera los efectos de sitio, efectos topográficos, efectos provocados por sismos y la licuefacción (Macau Roig, 2008). Por tal motivo, los efectos de sitio, son un concepto fundamental al momento de determinar la intensidad del movimiento sísmico, este concepto fue considerado desde inicios de la sismología y ha sido versado por los japoneses desde el siglo XVIII (Angulo Carrillo, 2013).

La geología local juega un papel fundamental en cuanto a las características y comportamiento de las ondas sísmicas. De hecho, éstas, pueden verse amplificadas debido a la presencia de suelos poco consolidados, generando largas duraciones y movimientos de suelo fuertes (Borcherdt, 1970), sin embargo, de presentarse en roca, las duraciones del movimiento del suelo disminuyen, es decir, la onda se atenúa. Es tal la importancia de predecir las respuestas de los efectos de sitio, pues estos son necesarios al momento del diseño de estructuras. Boore (2004), señala que, al momento de predecir estas respuestas, es importante saber el tipo que se predice y el nivel de precisión que requiere la predicción, además su estudio presenta la dificultad que se genera al momento de predecir una respuesta a un efecto de sitio específico a un terremoto.

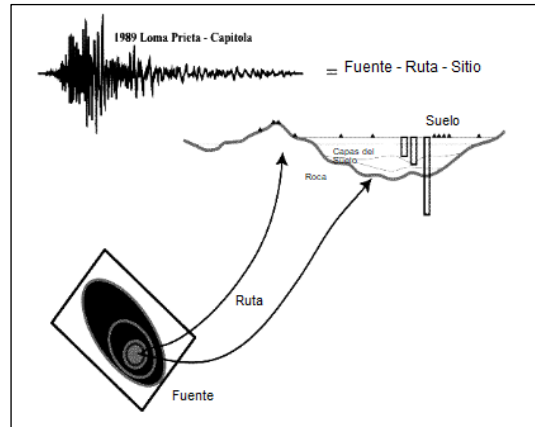
Figura 1
Movimiento registrado en suelo y roca, en sus tres componentes



Fuente: (Boore, 2004)

Entonces, la respuesta del efecto de sitio, puede ser definida como la relación del movimiento del suelo (espectro de Fourier) en un punto particular (llámese punto A) versus otro punto en un sitio distinto (llámese punto B), para un solo sismo o múltiples sismos (Boore, 2004). En consecuencia, el efecto de sitio, es el producto del movimiento del suelo debido a la ocurrencia del sismo, mismo que obedece a parámetros relacionados a la fuente sísmica, y a la atenuación de las ondas que se propagan desde la fuente al sitio de análisis (Chávez-García & Montalva, 2014). Sin embargo, existen otros factores que pueden afectar al movimiento del suelo en un sitio; siendo el proceso físico usual el siguiente: fuente – ruta – sitio, tal y como se indica en la siguiente figura.

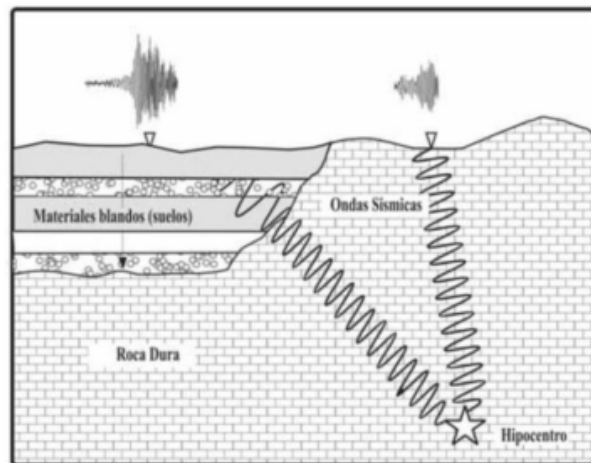
Figura 2
Representación del movimiento del suelo



Fuente: (Boore, 2004)

Por consiguiente, se deduce que los efectos de sitio son un resultado de las alteraciones que sufren las ondas sísmicas en presencia de suelos considerados como blandos, es decir, aquellos suelos en donde los materiales que lo componen no están consolidados. Durante la ocurrencia de sismos se ha observado que las propiedades topográficas, geotécnicas y geológicas del suelo en los estratos que son superficiales, tienen una inminente influencia sobre las características del movimiento del suelo; pues son precisamente estos estratos los que determinan la amplitud, contenido de frecuencia y duración del evento telúrico (CENAPRED, 2017).

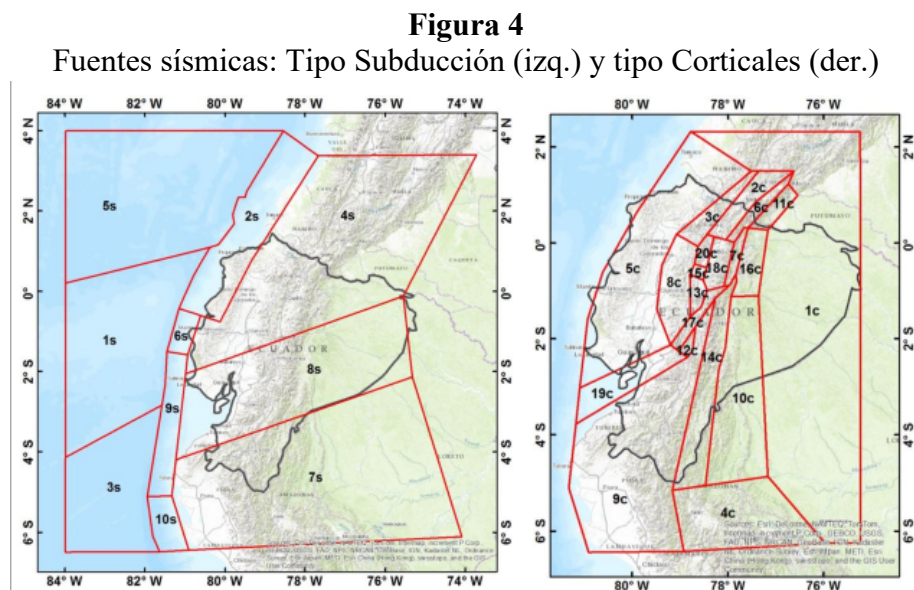
Figura 3
Concepto de efecto de sitio



Fuente: (Angulo Carrillo, 2013)

El Ecuador, está formado por una región continental y una región insular (las islas Galápagos). La parte continental se encuentra dividida por tres regiones: costa, sierra y oriente, siendo las dos primeras las más importantes de considerar al momento de un estudio de sismicidad. La zona de la costa por encontrarse muy cercana a la zona de subducción entre las placas Nazca y la Sudamericana; y, la zona de la sierra debido a su geodinámica pues presenta gran cantidad de fallas debido a los pliegues que se producen (P. D. Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016). Ecuador forma parte de una microplaca llamada Bloque Andino, la cual pertenece a la capa sudamericana y además presenta un movimiento tectónico muy particular. La microplaca tiene interacción entre las placas Nazca, Caribe y Cocos, y registra un movimiento medido entre 50 – 60 mm por año, a su vez la placa continental registra un movimiento de entre 2 – 5 mm por año. Adicionalmente, el sur del Ecuador presenta interacción entre la placa Sudamericana y Nazca; todo lo indicado, ha generado que en Ecuador aparezcan tres inclinaciones de subducción de la placa Nazca sobre la placa Sudamericana (Taípe Acosta, 2013).

La conducta dinámica ha concebido un sistema de fallas al cual Alvarado, (2012) la denomina “Sistema Mayor Dextral”; el cual exhibe una gran agrupación de pliegues y fallas en la región correspondiente a la sierra; siendo este sistema de fallas una de las principales fuentes generadoras de sismos para el Ecuador. En la siguiente figura se indica la geometría de las fuentes determinadas por (Alvarado, 2012).



Fuente: (Alvarado, 2012)

Cuenca es considerada como la tercera ciudad más importante del Ecuador, es la capital de la provincia del Azuay, está ubicada sobre un valle fluvial y se emplaza a 2500 m.s.n.m.; durante los últimos años ha experimentado un gran crecimiento demográfico y un extenso desarrollo urbanístico, lo que como consecuencia ha generado la expansión de la ciudad hacia sectores con poco control de planificación sobre el uso de suelo. En estas distintas áreas de expansión, se han levantado todo tipo de edificaciones, lo que ha coadyuvado a la aparición de varios problemas de índole geológico (Encalada, 2002).

Si bien es cierto, el Ecuador cuenta con un mapa de zonificación sísmica nacional, el cual está plasmado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC – 15, dentro de su capítulo de Peligro Sísmico, sin embargo, a nivel cantonal, (Encalada, 2002) realizó una investigación para el BID – P400. El documento presenta la caracterización de los tipos de formaciones geológicas para en las distintas zonas de la ciudad y para los diferentes estratos, además, de comparar los registros medidos en estaciones de suelo A, B y C versus los registros disponibles de las estaciones sismográficas de la Red Sísmica de Austro. Este mismo estudio, manifiesta que los valores obtenidos deberán ser comprobados en futuras investigaciones, ya que los depósitos fueron modelados en función a parámetros obtenidos de la prospección geofísica, sin embargo, algunos parámetros como la velocidad de ondas de corte fueron obtenidos a partir de una correlación que se basa en información de apoyo, por lo tanto, los valores obtenidos deberán ser referenciales y verificados en futuras investigaciones.

De la misma manera, para la ciudad de Cuenca se ha desarrollado la investigación de (P. D. Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016), la cual, presenta los espectros de diseño sísmico para la ciudad de Cuenca, en donde además exhibe los parámetros de sismicidad para cada una de las 30 fuentes sísmicas del Ecuador, quienes basan su estudio en el realizado por la Universidad de Cuenca en el año 2000, y, recomiendan realizar un estudio detallado en cuanto a la atenuación de las ondas sísmicas mediante la realización de ensayos que permitan obtener estos resultados.

Azuay es la tercera provincia más importante del Ecuador; la cual está constituida por quince cantones, en donde el cantón Cuenca es el más extenso. Por su parte, el cantón Cuenca está integrado por 21 parroquias, en donde el presente estudio se ha llevado a cabo, tomando como análisis puntos de interés para el análisis.

Mapa 1
Ubicación Geográfica



Fuente: Autor

Figura 5
Equipos para ensayos



Fuente: El Autor

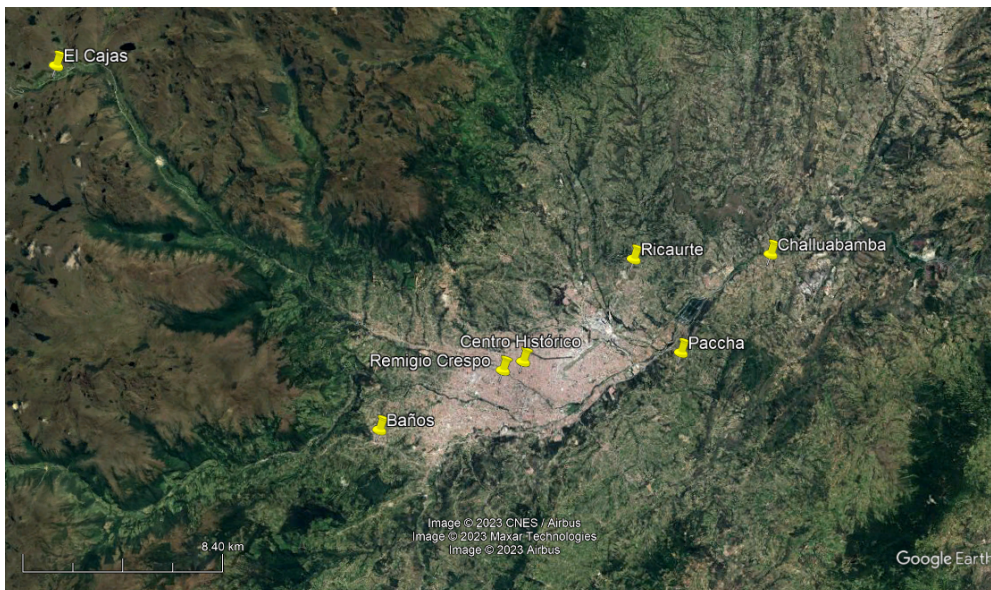
Métodos y materiales

Para el desarrollo de la investigación fue necesario, en primer lugar, definir una propuesta de distribución de los puntos a analizar en función de la revisión y análisis geológico y geomorfológico de la zona de estudio; y, en segundo lugar, se verificó que el estudio abarque la mayor extensión del cantón Cuenca, considerando sobre todo las zonas identificadas como potenciales expansiones de crecimiento de la ciudad de Cuenca.

El criterio que se utilizó para plantear la distribución de puntos en los cuales se debe realizar el ensayo, fue el de densificar la zona en donde se evidenciaron depósitos sedimentarios y con tipologías de suelos geotécnicamente catalogados como blandos, deduciendo que en esas zonas se generará una amplificación de las ondas sísmicas, lo que permite evaluar el efecto de sitio ahí formado. Por otra parte, las zonas correspondientes a zonas estables fueron de igual forma consideradas para el análisis, pues se concluyó que sobre estas estructuras se presentarán efectos de sitio menores, esto debido a sus propiedades litológicas.

De igual manera, resultó indispensable partir del análisis de la información recopilada de estudios similares realizados previamente por (Besabe et al., 1998; Coronel Martínez & Ortíz Andrade, 2020; Domínguez Cabrera & Vargas Pinos, 2020; Maldonado Noboa et al., 2022; Monge Guamán, 2022; Urgiles Parra et al., 2021), en donde finalmente se establecieron como puntos de interés para el análisis los indicados en el siguiente mapa.

Mapa 2
Puntos de análisis



Fuente: El Autor

En cuanto a los equipos utilizados para el levantamiento de información, el principal dispositivo que fue utilizado corresponde a un acelerómetro triaxial de la marca Raspberry Shake, modelo RS4D, con el cual se realizó el ensayo de vibración forzada, para de esta manera generar un impulso adecuado que permita analizar el comportamiento del suelo; el equipo presenta las siguientes características:

- Sistema triaxial (este, norte y vertical).
- Detecta microsismicidad vertical.
- Extenso ancho de banda para registrar velocidad y aceleración.
- Software SeisComp3.
- ADC de 24 bits, rango dinámico de 144 dB.
- Geófono integrado de 4.5 Hz.
- Sistema de alerta temprana ante terremotos.
- Actualizaciones automáticas.
- Sistema Operativo: Debian 8 (Linux).
- Compatible con Firefox / Chrome / IE para la visualización de datos.
- Aplicaciones para visualización de datos compatibles con Windows, Mac y Linux.

Figura 5
Acelerómetro



Fuente: (Raspberry Shake, 2020)

Por otra parte, se utilizó también un sismógrafo de exploración compacto GEA24 de la casa comercial PASI; el cual permite usar hasta 24 canales, consiste en un sistema de fácil uso, pues no necesita una batería de 12 V externa, sino por el contrario, basta con conectarlo directamente a la computadora portátil para que inicie su funcionamiento. Los geófonos que utiliza corresponden a 4.5 Hz, es un equipo comúnmente utilizado para la realización del ensayo MASW, además, los datos que genera, son compatibles con softwares muy usados dentro de la rama de la Geotecnia; como lo es Geopsy.

Figura 6
Sismógrafo de exploración GEA24



Fuente: (PASI, 2020)

En cuanto a la extracción de datos y procesamiento de información se utilizaron Softwares como Swarm, Geopsy y SeismoSignal, a continuación, se detalla brevemente información correspondiente a cada uno de los programas en mención.

Swarm consiste en una aplicación Java que ha sido diseñada con el objetivo de mostrar y analizar formas de onda sísmicas en tiempo real, el cual, además, puede conectarse y leer desde una variedad de diferentes fuentes de datos estáticos y dinámicos. El programa Swarm cuenta con herramientas de análisis de dominio de tiempo y frecuencia, a más de una plataforma de mapeo bastante simple, pero por otra parte muy eficaz. Swarm presenta varias ventajas, sin embargo, la principal es que es de código abierto, el cual se encuentra disponible de forma gratuita y por lo tanto es de dominio público (Argueta Ordoñez, 2019). El programa fue desarrollado originalmente durante los años 2004 – 2005 por Dan Cervelli y Peter Cervelli del USGS Volcano Science Center (USGS, 2018).

Por otra parte, Geopsy, es un software gratuito y de igual forma de código abierto, fue desarrollado gracias al proyecto europeo SESAME, y su desarrollo, y estructura se basó totalmente en este proyecto, el cual inició su total funcionamiento a mediados del 2005. Geopsy es un programa de mucha utilidad al momento del procesamiento de ondas superficiales en sus diferentes métodos (Geopsy, 2006; Saldivia Pantanalli, 2014).

Finalmente, SeismoSignal, es otro de los softwares que utilizados para el procesamiento de datos en la presente investigación; el cual corresponde a un programa de fácil y eficiente procesamiento de datos, comúnmente requeridos por ingenieros sismólogos. El programa SeismoSignal permite realizar el filtrado de frecuencias altas y bajas de las señales registradas, así como la corrección de la línea base, para, de esta forma, eliminar cualquier tipo de ruido ambiental, que sea ajeno al correspondiente del movimiento del suelo y de esta

forma poder determinar parámetros importantes dentro de la ingeniería sísmica, como lo son la velocidad de la onda de corte y el periodo del suelo (Seismosoft, 2023).

En cuanto a los ensayos llevados a cabo, consiste en el ensayo de Análisis Multicanal de ondas superficiales (MASW) y el ensayo de vibración forzada; en donde el primero fue realizado únicamente con el objetivo de calibrar los datos obtenidos mediante el ensayo de vibración forzada. A continuación, se detalla brevemente la metodología de los ensayos en mención.

El ensayo de MASW se introdujo por primera vez por (Park et al., 1999), y consiste básicamente en aplicar un impulso como una fuente vibratoria, el cual, mide las ondas superficiales a través de una línea de geófonos con el objetivo de crear el perfil de velocidad de la misma. El ensayo permite medir ondas superficiales que son de baja frecuencia de rangos entre 3 a 30 Hz. (Suárez Gómez, 2017).

El procedimiento para la obtención de datos, consiste en instalar geófonos en una línea recta; los cuales se encargarán del registro de movimientos verticales, y además su alineación debe ser considerando el mismo espaciamiento (Park et al., 2007), para el presente estudio la separación entre geófonos fue de 1 metro. Los geófonos utilizados en el ensayo son de baja frecuencia (4,5 Hz) (Suárez Gómez, 2017). Luego, para crear las ondas sísmicas es necesario generar un impulso que sirva como fuente sísmica; para ello se utilizó un combo, cuyo peso es de 8 Kg.

Figura 7

Ensayo MASW y vibración forzada



Fuente: El Autor

Por otro lado, se realizó, de igual manera un ensayo de vibración forzada, para realizar el registro de datos mediante el acelerómetro triaxial, sabiendo que el dispositivo cuenta con un geófono de 4.5 Hz, que permite detectar las vibraciones de la tierra. Para poder generar la vibración forzada, es indispensable generar un impulso, el cual fue creado considerando los mismos parámetros tomados en cuenta al momento de generar el impulso para el ensayo MASW, es decir, se consideró un combo de 8 Kg.

Cabe destacar que, se tomaron grabaciones de alrededor de 30 min previo a la generación del impulso.

Figura 8
Ensayo vibración forzada



Fuente: El Autor

Resultados y Discusión

Como punto de partida, se realizó ambos ensayos (MASW y Vibración Forzada) en dos puntos de los siete analizados para de esta manera comprobar que los datos obtenidos son muy similares entre sí, y así continuar con los demás puntos, únicamente con el ensayo de vibración forzada, ya que es un ensayo de menor dificultad, el cual brinda los parámetros necesarios para ser considerados al momento de realizar un diseño estructural, considerando los efectos de sitio necesarios. Los datos obtenidos son los siguientes:

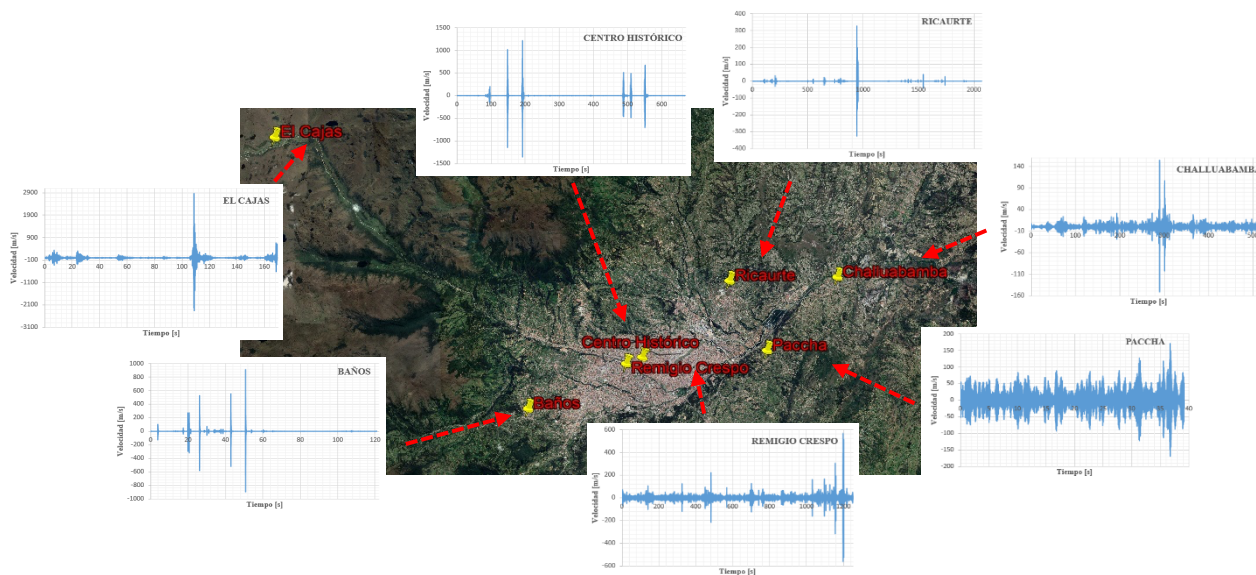
Tabla 1
Resultados ensayos MASW y Vibración forzada

Punto Análisis	Velocidad [m/s]		Periodo [s]		Tipo de Suelo
	MASW	Vibración Forzada	MASW	Vibración Forzada	
Ricaurte	321	325	0,28	0,31	D
Baños	982	912	0,085	0,09	B

Fuente: El Autor

Una vez realizado el primer análisis, puede observarse que los datos obtenidos entre ambos ensayos, son muy aproximados, lo que genera confianza para usar cualquier equipo para estudiar los siguientes puntos. Se opta por realizar el ensayo de vibración forzada mediante el uso del acelerómetro Raspberry Shake, ya que los datos que se obtienen son suficientes para considerarlos como parámetros para realizar el diseño estructural de una edificación, considerando los efectos de sitio de la zona de emplazamiento de la misma.

Figura 9
Gráficas de velocidad obtenidas



Fuente: El Autor

Luego de obtener las gráficas correspondientes a la velocidad de onda de corte para cada uno de los puntos estudiados, se procede a seguir lo indicado en la Tabla 2 del capítulo NEC-SE-DS, de la Norma Ecuatoriana de la Construcción para poder clasificar el perfil del suelo.

Tabla 2
Criterio de clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente.	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media.	1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda.	760 m/s $> V_s \geq 360$ m/s
D	Perfiles de suelos rígidos	360 m/s $> V_s \geq 180$ m/s
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de corte	$V_s < 180$ m/s
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio.	

Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014)

Los resultados correspondientes a la velocidad de onda corte y el tipo de suelo, para cada uno de los puntos de análisis, se detallan en la siguiente tabla.

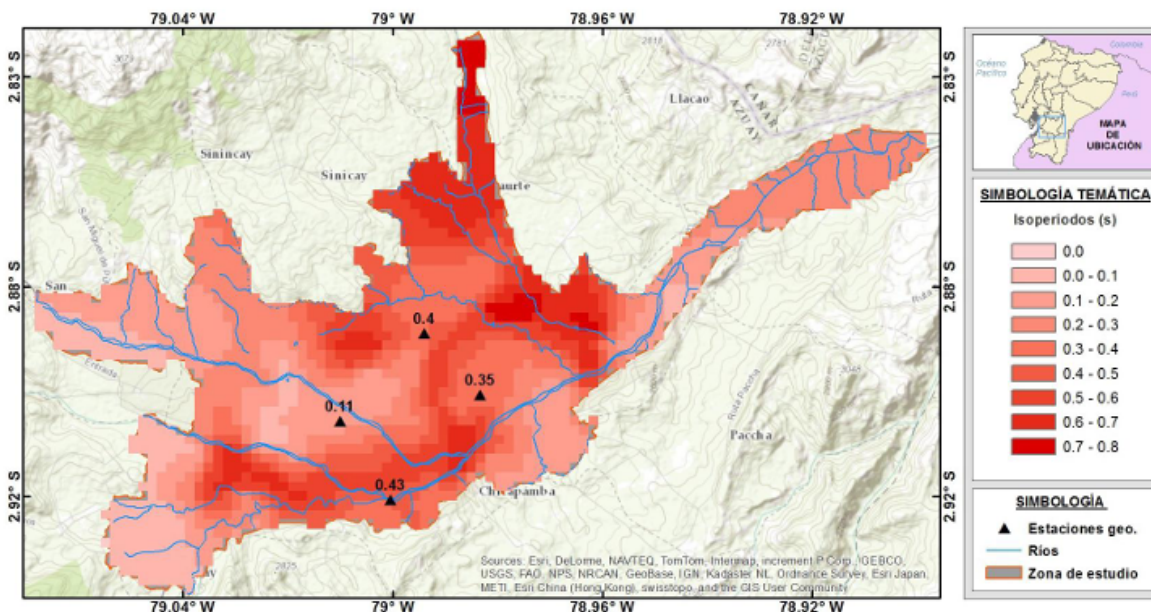
Tabla 3
Velocidades de onda de corte y tipo de suelo

Punto Análisis	Velocidad [m/s]	Tipo de Suelo
Baños	982	B
Paccha	169	E
Centro Histórico	1355	B
Remigio Crespo	564	C
Challuabamba	153	E
El Cajas	2798	A
Ricaurte	325	D

Fuente: El Autor

En cuanto a los periodos del suelo de cada uno de los puntos en análisis, éstos fueron comparados con los valores establecidos en las investigaciones de (Espinoza Cárdenas & Quinde Martínez, 2022; P. D. Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016).

Figura 10
 Mapa de isoperiodos para la ciudad de Cuenca



Fuente: (P. Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016)

Los valores correspondientes a los periodos del suelo calculados, se aproximan a los valores que han sido concebidos a partir de investigaciones anteriores, garantizando de esta manera que el ensayo es válido y genera confianza para la obtención de parámetros necesarios al momento de realizar una modelación y un diseño estructural. Los periodos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 4
 Periodo del suelo

Punto Análisis	Periodo investigado [s]	Periodo calculado [s]
Baños	0,05	0,09
Paccha	0,68	0,73
Centro Histórico	0,09	0,05
Remigio Crespo	0,11	0,13
Challuabamba	0,40	0,46
El Cajas	0,02	0,015
Ricaurte	0,35	0,31

Fuente: El Autor

Conclusiones

La presente investigación, sirve de punto de partida para establecer como metodología de trabajo, la ejecución del ensayo de vibración forzada, para la determinación de parámetros como la velocidad de onda de corte y periodo del suelo, previo al diseño estructural de una estructura, permitiendo disminuir incertidumbre en el mismo y garantizando un diseño eficiente.

Los equipos utilizados para la realización de los ensayos MASW y de vibración forzada, generan datos aproximados entre sí, por lo que es viable la utilización de cualquiera de ellos, para la generación de información. Se recomienda la investigación y comparación con otros equipos análogos que permitan la generación de mayor información.

El cantón Cuenca, se ha extendido hacia áreas consideradas como inestables, es por ello que, se recomienda realizar más ensayos a lo largo del cantón, sobre todo, con mayor énfasis en aquellas zonas catalogadas como inestables, ya que de esta manera se genera información necesaria para la elaboración de una microzonificación del cantón.

Finalmente, el presente trabajo, puede facilitar, además de ser el arranque para la generación de un mapa tridimensional del suelo del cantón Cuenca.

Referencias bibliográficas

- Alvarado, A. (2012). *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur* [Université de Grenoble, Francia]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00870332/document>
- Angulo Carrillo, J. (2013). *Microzonificación y escenarios sísmicos para la ciudad de Apizaco, Tlaxcala* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/6520?show=full>
- Argueta Ordoñez, P. D. (2019). *Reconocimiento automático de señales sísmo volcánicas en el volcán Santiaguito, Guatemala* [Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2019-11/Peter.pdf>
- Besabe, P., Almeida Escobar, E., Bonnard, C., & Heredia, B. (1998). *Prevención de desastres naturales en la cuenca del Paute - Proyecto PRECUPA - Componente B* (pp. 1-61).
- Boore, D. M. (2004). Can site response be predicted? *Journal of Earthquake Engineering*, 8(1), 1-41. <https://doi.org/10.1080/13632460409350520>
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), 29-61, ISSN: 0037-1106. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/60/1/29/101559/Effects-of-local-geology-on-ground-motion-near-San?redirectedFrom=fulltext>
- CENAPRED. (2017). *Metodología para realizar estudios de microzonificación sísmica*. Centro Nacional de prevención de desastres, Mexico, D.F.
- Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos*, 16, 6-30. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132014000200001>
- Coronel Martínez, D. I., & Ortiz Andrade, W. A. (2020). *Determinación de parámetros geomecánicos del subsuelo lado N/O, campus Miracielos Ricaurte, necesarios para el proyecto investigativo "Microzonificación sísmica y mapa de riesgos."* Universidad Católica de Cuenca.
- Domínguez Cabrera, P. C., & Vargas Pinos, S. P. (2020). *Determinación de parámetros geomecánicos del subsuelo, lado noreste, campus Miracielos, Ricaurte, aplicando métodos geotécnicos y geofísicos, correlacionando sus resultados*. Universidad Católica de Cuenca.
- Encalada, M. (2002). *Amenaza sísmica en el autro, vulnerabilidad y riesgo sísmico en la ciudad de Cuenca*. Universidad de Cuenca.
- Espinoza Cárdenas, M., & Quinde Martínez, P. (2022). Caracterización de las amplificaciones de onda del suelo blando en Cuenca. *ConcienciaDigital*, 5(1), 188-207. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i1.2067>
- Geopsy. (2006). *Geopsy Project*. <https://www.geopsy.org/index.html>
- Macau Roig, A. (2008). *Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Maldonado Noboa, J. S., Bermudez Pacheco, K., & Yupa Pomaquiza, A. (2022). *Seismic ambient noise vibration in the rural parishes of Cuenca Ecuador to estimate the soil*

- fundamental period.*
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). Cargas Sísmicas - Diseño Sismorresistente. In *Norma Ecuatoriana de la Construcción - NEC* (pp. 1–139). <https://doi.org/10.1533/9781782420477.27>
- Monge Guamán, J. D. (2022). *Determinación y correlación de parámetros elásticos de las capas del subsuelo aplicando métodos geofísicos y geotécnicos* [Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/7954>
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *The Leading Edge*.
- PASI. (2020). *User Manual. Seismograph GEA24*.
- 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. *Ingeniería Sísmica*, 26(94), 1–26. <https://doi.org/10.18867/ris.94.274>
- Quinde Martínez, P., & 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, 1–26, ISSN: 0185-092X. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2016000100001
- Raspberry Shake. (2020). *RS4D. Strong Motion Seismograph*. https://shop.raspberryshake.org/product/turnkey-iot-home-earth-monitor-rs-4d/?attribute_pa_variation=indoor&attribute_pa_license=private-use-125-discount
- Saldivia Pantanalli, J. C. (2014). *Determinación del período fundamental de vibración del suelo aplicando el criterio SESAME*. <http://repositorio.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/150>
- Seismosoft. (2023). *Seismosoft's Suite of earthquake tools - SeismoApps*.
- Suárez Gómez, L. R. (2017). *Optimización de parámetros para adquisición de datos medidos in situ por medio del método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)* [Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23575/3560900258445UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Taípe Acosta, L. M. (2013). *Análisis de las ecuaciones de predicción de movimientos de suelo para el Ecuador utilizando datos registrados durante el periodo 2000 - 2011 en estaciones sísmicas de banda ancha y acelerógrafos* (pp. 1–148). Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6447/1/CD-4961.pdf>
- Urgiles Parra, D. del R., Maldonado Noboa, J. S., & Almache Sánchez, L. M. (2021). Microzonification of Floor with Sliding in Nulti Parish. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1203/3/032126>
- USGS. (2018). *Software. Swarm*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5066/P93A9MWK>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

A la Universidad Católica de Cuenca por proveer los equipos necesarios para el desarrollo de la presente investigación. De igual forma, al Ing. Juan Maldonado por su constante asesoría y apoyo a lo largo de toda la investigación.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.