

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CUENCA DE LOJA BASADA EN EL ANÁLISIS DE LOS PERIODOS FUNDAMENTALES DEL TERRENO UTILIZANDO EL MÉTODO NAKAMURA, ECUADOR

Diego Israel Castillo Jaramillo¹, Maritza Ximena Ochoa Tapia^{1*}, Diego Alexander Pacheco Cueva¹, Edwin Danilo Ramos Campoverde¹, Kevin Fernando Iñiguez Tapia¹, Leonardo David Correa Vines¹, Tatiana Janeth Zhingre Pambi¹, Cecilia Alexandra Romero Jaramillo¹, Jomahira Elizabeth Bueno Apolo¹, Fermín Alexander González Sisalima¹ y Hernán Luis Castillo García¹

1. Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.

*Autor de correspondencia: maritza.ochoa@unl.edu.ec

DOI:

<https://doi.org/10.55467/reder.v10i2.219>

RECIBIDO

23 de mayo de 2025

ACEPTADO

6 de septiembre de 2025

PUBLICADO

1 de julio de 2026

RESUMEN

Este artículo aborda la necesidad de comprender la respuesta dinámica del suelo ante eventos sísmicos en la Cuenca de Loja, Ecuador. El propósito fue determinar los periodos fundamentales de vibración del terreno mediante el análisis detallado de ruido ambiental; factor crucial para evaluar la amenaza sísmica y contribuir a estrategias de mitigación de riesgos. Se empleó un acelerógrafo triaxial y el método de estimación de las características dinámicas del subsuelo mediante el uso de microtemores o ruido ambiental de Nakamura propuesto en 1989, para analizar los periodos fundamentales de vibración del terreno en la cuenca de estudio. La investigación proporcionó información detallada sobre la respuesta dinámica local del terreno, y su variabilidad. La zonificación sísmica marcó la presencia de periodos medios (0.2 s – 0.8 s), con ocurrencias menores de periodos largos (0.8 s – 1.4 s), y periodos largos (0.8 s – 1.4 s) a muy largos (1.4 s – 2.0 s) en ciertas áreas de la cuenca. El estudio presenta un mapa detallado de periodos fundamentales del subsuelo y su zonificación como parte del estudio de los efectos de sitio y microzonificación sísmica de la Cuenca de Loja.

PALABRAS CLAVES

Microtemores; Periodo de vibración; Amenaza sísmica; Riesgo sísmico; Ecuador

SEISMIC MICROZONATION OF THE LOJA BASIN BASED ON FUNDAMENTAL GROUND PERIOD ANALYSIS USING THE NAKAMURA METHOD, ECUADOR

ABSTRACT

This article addresses the need to understand the dynamic response of the ground to seismic events in the Loja Basin, Ecuador. The aim was to determine the fundamental vibration periods of the ground through detailed analysis of microtemors or ambient seismic noise, a crucial factor for improving seismic hazard assessment and contributing to risk mitigation strategies. A triaxial accelerograph and Nakamura's method (1989) for estimating subsurface dynamic characteristics using microtemors or ambient noise were employed to analyze the fundamental ground vibration periods in the study basin. The research provided detailed information on the local dynamic response of the ground and its variability. Seismic zoning revealed the presence of intermediate periods (0.2 s – 0.8 s), with occasional occurrences of longer periods (0.8 s – 1.4 s), and long (0.8 s – 1.4 s) and very long (1.4 s – 2.0 s) periods in certain areas of the basin. The study contributes a detailed map of fundamental subsurface periods and their zoning, as part of the site effects analysis and seismic microzonation of the Loja Basin.

KEYWORDS

Microtemores; Vibration period; Seismic hazard; Seismic risk; Ecuador

Formato cita

Recomendada (APA):

Castillo Jaramillo, D.I., Ochoa Tapia, M.X., Pacheco Cueva, D.A., Ramos Campoverde, E.D., Iñiguez Tapia, K.F., Correa Vines, L.D., Zhingre Pambi, T.J., Romero Jaramillo, C.A., Bueno Apolo, J.E., González Sisalima, F.A. & Castillo García, H.L. (2026). Microzonificación Sísmica de la Cuenca de Loja Basada en el Análisis de los Periodos Fundamentales del Terreno Utilizando el Método Nakamura, Ecuador. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 10(2), 275-286. <https://doi.org/10.55467/reder.v10i2.219>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

INTRODUCCIÓN

El estudio de las características dinámicas de los suelos es un desafío para los diseñadores e investigadores, que, a través del conocimiento de la geología local, los métodos geotécnicos o geofísicos tradicionales buscan identificar los efectos que los sismos van a tener en la superficie del terreno y en las estructuras que se posan sobre él, con altos costos de inversión. Uno de los métodos para estimar las características dinámicas del subsuelo es el estudio del ruido ambiental o microtemores (Nakamura, 1989), el cual resulta en una herramienta crucial en la determinación de los periodos predominantes de subsuelo.

En el ámbito de la ingeniería sísmica, el análisis de periodos predominantes del subsuelo es fundamental para la posterior comprensión de la respuesta sísmica de las edificaciones como parte de los estudios de microzonificación sísmica, peligro sísmico y vulnerabilidad. El método avanzado de Nakamura o método H/V, a lo largo del tiempo pasó a ser un método eficaz en la determinación del periodo de resonancia del subsuelo, su amplificación asociada, así como la estructura de las capas de sedimentos sin necesidad de información geológica adicional de forma simple y económica, utilizando mediciones sísmicas pasivas y la diferencia entre las ondas verticales y horizontales (Nakamura, 2000).

Investigaciones más recientes, como la desarrollada por Derras et al. en 2017, empleó redes neuronales artificiales para predecir y complementar los valores de periodo predominante del subsuelo con variables como el valor de la velocidad de onda de corte Vs30, profundidad del basamento geotécnico o la pendiente del terreno para predecir el comportamiento dinámico del subsuelo. Otras investigaciones, como Piña-Flores et al. (2017) fuera de la aceptación o no del método Nakamura, se centran en la aplicación práctica de la relación H/V y su inversión como método para obtener las variaciones del perfil de velocidad del subsuelo o profundidad del lecho rocoso con datos concordantes con datos sísmicos tradicionales realizados previamente.

Como una pequeña mirada de las experiencias prácticas del estudio de microtemores a nivel global, tenemos los estudios en taludes como los de Burjánek et al. (2018) que caracterizaron las vibraciones ambientales y monitorearon un talud de roca próximo al colapso o los estudios de Fiolleau et al. (2020) que caracterizaron sísmicamente una ruptura de bloque de arcilla en el deslizamiento de tierra Harmaliere - Alpes franceses occidentales. Otras experiencias se enfocan en el uso del estudio de microtemores en determinaciones litológicas, así Tün et al. (2016) investigaron la profundidad del basamento rocoso (Vs mayor a 800m/s) de la cuenca cuaternaria de Eskisehir (Turquía) utilizando el método del microtemores y la autocorrección espacial SPAC; de igual manera Mascandola et al. (2019) mapearon el lecho rocoso en la Po Plain – Italia utilizando ruido ambiental y la inversión de la relación H/V. Finalmente el estudio de microtemores no se enfoca solamente en estudios en el subsuelo, sino que se extiende al estudio del periodo de vibración en edificaciones; Kohler et al. (2005) midieron las propiedades dinámicas del edificio Factor de la Universidad de California - Los Ángeles, conformado por una estructura de acero resistente a momentos, al analizar mediciones de vibraciones ambientales; por otro lado, Parajuli et al. (2011) realizaron la caracterización dinámica mediante la medición de micro-temores en un edificio histórico en Katmandú.

Dentro del campo específico relacionado a nuestra investigación, el estudio sismológico de periodos fundamentales del subsuelo ha sido de suma importancia en innumerables investigaciones. Mora et al. (2001); Motamed et al. (2007); Wood et al. (2011); Ibarra-Torúa et al. (2015); Ullah et al. (2022); Wibowo et al. (2023) caracterizaron y evaluaron los efectos de sitio en de Costa Rica, Irán, Nueva Zelanda, Baja California, Pakistan e Indonesia respectivamente. Localmente en concordancia de la alta sismicidad de Ecuador, el Código Ecuatoriano de la Construcción en la sección de Peligro Sísmico - Diseño Sismo Resistente, (2015) en su interés de mitigar los riesgos sísmicos de las edificaciones exige estudios de microzonificación, recomendado el método Nakamura, (1989) para determinar los periodos predominantes del subsuelo.

Varios autores han investigado el comportamiento dinámico de la cuenca de Loja, la primera investigación conocida es de Guartán (2010), realizó mediciones de ruido ambiental (mallado 1000 x 1000 m) con mayor densificación de medidas en el área urbana de la ciudad (mallado 500 x 500 m) con un total de 72 puntos y tiempo de grabación de 10 minutos, desde los 0.1 Hz, obteniéndose mayoritariamente periodos medios (0.2 s – 0.8 s), con una media global de 0.35 s con mayor tendencia hacia el rango bajo y en complemento han realizado la inversión de un punto en el

centro de la cuenca obteniendo el perfil de velocidades de corte del subsuelo con valor obtenido de V_s 30 de 346 m/s. Posteriormente Rivera et al. (2013) han realizado nuevas mediciones con mayor nivel de detalle pero centradas en el centro urbano de la ciudad, correspondiente a un total de 92 puntos (mallado de 250 x 250 m) y tiempo de grabación de 10 minutos, desde los 0.1 Hz, obteniéndose resultados con periodos en promedio largos (mayores a 0.8 s) que combinados con los 72 puntos de la investigación anterior reportan periodos de 0.92 ± 0.63 para la formación San Cayetano, 0.85 ± 0.60 para la formación Quillollaco, 1.35 ± 0.25 y 0.78 ± 0.51 para aluviales. Finalmente, Castillo & González (2018) han realizado nuevas mediciones sistemáticas de ruido ambiental (mallado 2000 x 2000 m) con un total de 40 puntos y mayor tiempo de grabación (15 a 20 minutos), obteniéndose resultados que variaron desde los 0.21 a 1.9 s.

Del contraste de los estudios anteriores se ha determinado que aún no se ha definido con claridad la caracterización dinámica del subsuelo de la cuenca de Loja correspondiente al periodo de vibración predominante del subsuelo, mostrando en cada estudio un aumento en el periodo fundamental obtenido. Además, no se ha establecido un mallado sistemático a detalle en toda la cuenca, siendo el mejor mallado hasta el momento del de 250 x 250 m realizado solamente en el centro urbano de la ciudad, y en la mayoría de investigaciones se ha utilizado un tiempo de grabado bajo de 10 minutos, lo cual no tiene correspondencia con la profundidad de la cuenca de Loja, como lo recomienda la guía para la implementación del Método Espectral H/V que permite estimar la frecuencia fundamental del suelo y evaluar posibles efectos de amplificación sísmica en un sitio determinado (SESAME, 2004).

Se plantea que la medición de microtemores y su análisis espectral H/V es efectivo para estimar los periodos predominantes de vibración predominantes del subsuelo en Loja – Ecuador, y que una caracterización detallada elimina la incertidumbre de los estudios precedentes, al mejorar principalmente los criterios de mallado y el tiempo de grabación con base en la guía generada por SESAME Project (2024), lo cual contribuye a mejorar la comprensión de la respuesta sísmica local y facilita la continuidad de investigaciones posteriores para mitigación del riesgo sísmico. Además, la medición de periodos predominantes a detalle converge en una zonificación final con uso inmediato en el diseño sismo resistente de edificios, el análisis de resonancia y en general, como base para el ordenamiento territorial y la microzonificación sísmica local.

El objetivo de este estudio fue investigar y analizar a detalle los periodos predominantes de vibración del subsuelo en Loja – Ecuador, utilizando el método Nakamura, en zona urbana de Loja obteniendo 924 puntos de muestreo y mejorando el tiempo de grabación del ruido ambiental, el cual fue superior a los 20 minutos, con el fin de obtener una zonificación definitiva que mejora la comprensión de la respuesta sísmica local y aportar a la seguridad ante terremotos.

METODOLOGÍA

Registro de datos

Para el registro de datos se parte de la limitación del perímetro urbano de la ciudad de Loja, como se observa en la Figura 1, en la cual se realizó un mallado sistemático de 250 x 250 metros por recomendación de la guía para la implementación del Método Espectral H/V (SESAME, 2004) teniendo como consecuencia 924 puntos de muestreo.

La duración de grabación se establece dependiendo del fenómeno vibratorio específico y teniendo en cuenta la frecuencia mínima esperada a medir. Para determinar el tiempo de grabación idóneo, que para la investigación fue de 20 minutos, se tomó el tiempo de registro que se establece de acuerdo a lo definido en SESAME Project (2004) y se muestra en la Tabla 1.

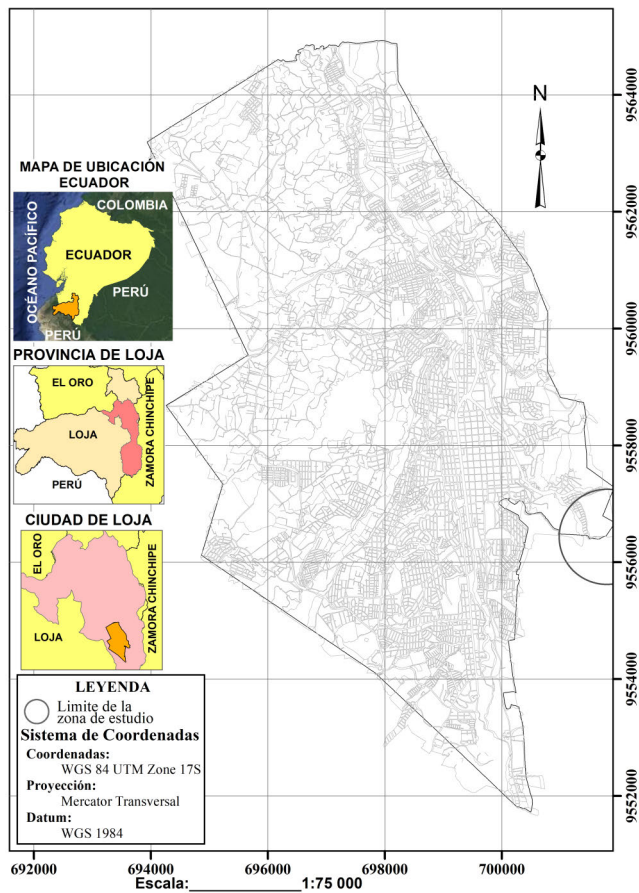


Figura 1. Área de estudio Ciudad de Loja – Ecuador
Fuente: Autores, 2026.

Tipo de parámetro	Recomendaciones principales	
	Frecuencia Mínima esperada (Hz)	Duración mínima esperada (Minutos)
Tiempo o duración de grabación	0.2	30'
	0.5	20'
	1	10'
	2	5'
	5	3'
	10	2'

Tabla 1. Tiempos de registro de vibraciones ambientales
Fuente: Guía para la implementación del Método Espectral H/V SESAME Project (2004).

Procesamiento de los registros

El procesamiento de los datos para obtener el cociente H/V se realiza mediante el software Gilla® versión 10.2 (MoHo, 2023). Se aplica la conversión de las tres componentes de vibración mediante la Rápida de Fouler (FFT) y se realizó el suavizado de curvas mediante el método de Konno y Omachi.

Se realiza el cálculo de la relación espectral H/V, donde se evalúa el comportamiento dinámico del terreno en las tres componentes espectrales, eliminando los ruidos artificiales, y obteniendo una curva limpia, para asegurar que las mediciones sean tanto precisas como relevantes.

Interpretación y Validación de los datos: Tipos de Curvas de H/V.

La aplicación del Método Espectral H/V la Guía de SESAME Project (2004) propone evaluar las curvas obtenidas mediante dos grupos de criterios, el primer grupo que consta de tres criterios primarios analiza la confiabilidad de la curva; y el segundo grupo de criterios secundarios aportan mayor detalle a la interpretación de la curva.

Los 3 criterios primarios se refieren a la calidad del pico dominante; a la estabilidad y duración relativa de la ventana; y a la relación de pico/ruido. Estos tres criterios deben ser cumplidos, de lo

contrario se debe repetir el análisis de datos después de modificar el tamaño de la ventana. Los criterios primarios se describen en la Tabla 2.

Criterios para una curva H/V confiable	
1	$f_0 > 10/L_w$
2	$n_c(f_0) > 200$
3	$\sigma_A(f) < 2$ por $0.5f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ por $0.5f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 > 0.5\text{Hz}$

Tabla 2. Criterios para una curva confiable

Fuente: Guía para la implementación del Método Espectral H/V SESAME Project (2004).

Los 6 criterios secundarios se enfocan en realizar un análisis detallado para la interpretación de la curva, donde se considera el valor absoluto de la amplitud del pico, ancho del pico, presencia de picos secundarios, consistencia en distintas orientaciones horizontales, sensibilidad a la selección de la ventana de análisis y la comparación con información geológica local. Es importante el cumplimiento de la mayoría de criterios, en el caso de no serlo, no implica que la curva H/V sea defectuosa como se observa en la Tabla 3.

Criterios para un pico HVSr claro	
1	$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
2	$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
3	$A_0 > 2$
4	$f \text{ cima}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
5	$\sigma_f < \mathcal{E}(f_0)$
6	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Tabla 3. Criterios para un pico

Fuente: Guía para la implementación del Método Espectral H/V SESAME Project (2004).

Luego de validar la confiabilidad de la curva H/V, para la obtención de las frecuencias predominantes, se identifica el pico principal y picos secundarios; y se corrobora con datos complementarios de la zona de estudio como información geológica / geotécnica disponible y estudios locales.

Representación cartográfica.

Mediante el uso de herramientas de SIG, se crea el mapa de Isolíneas predominantes obtenido a partir de los resultados de los registros de vibraciones ambientales, mediante interpolación de los resultados. La clasificación de los rangos de periodos fundamentales se basa en los estudios de Bray y Rodríguez-Marek (1997), donde plantea una clasificación de acuerdo al tipo de suelo, y a los rangos de valores de Vs presentes en el Código Ecuatoriano de la Construcción (NEC, 2015) como se muestra en la Tabla 4.

Descripción	Rango de velocidad de onda de corte Vs30 (m/s)	Periodo (s)	Categoría
Perfil de roca competente	$Vs30 \geq 1500$	≤ 0.1	Muy corto
Perfil de roca de rigidez media o < 6.00 m de suelo	$1500 > Vs30 \geq 760$	$\geq 0.1 - \leq 0.2$	Corto
Perfil de suelos muy densos de profundidad intermedia (30-60m) a roca blanda o meteorizada (20 a 30m)	$760 > Vs30 \geq 360$	$\geq 0.2 - \leq 0.8$	Medio
Perfiles de suelos rígidos profundos 60 - 210m. Capas de arcilla blanda de profundidad media a profunda 3 - 12m	$360 > Vs30 \geq 180$ $Vs30 < 180$	$\geq 0.8 - \leq 1.4$	Largo
Suelos rígidos muy profundos > 210 m	$360 > Vs30 \geq 180$	≥ 1.4	Muy largo

Tabla 4. Rangos de clasificación de periodos fundamentales

Fuente: Bray y Rodríguez-Marek (1997), Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015), y modificado por los autores, 2025.

Luego de obtener los informes de cada uno de los puntos de muestreo y el procesamiento del registro de microtemores, se generan los espectros de frecuencia H/V, marcando las frecuencias predominantes y su periodo predominante respectivo. Posterior a la obtención de los periodos predominantes, se realiza un análisis y contrastación de la litología de la zona de estudio con los periodos fundamentales obtenidos.

Finalmente, con los resultados de la investigación, se busca relacionar las características de amplificación de la zona de estudio en función de los periodos obtenidos de las mediciones de vibraciones de ruido ambientales, con el objetivo de estimar su efecto en el terreno.

RESULTADOS

Contexto Geológico Local

La cuenca de Loja está conformada por una secuencia sedimentaria variable, de tipo tectónico, en la cual, la serie deposicional está dividida al este y oeste por una falla de tipo inversa, yuxtaponiendo los sedimentos en posiciones diferentes. El basamento corresponde a rocas metamórficas de la Unidad Chiguinda que contiene filitas, pizarras, esquistos, cuarcitas y metacuarcitas; y rocas granitos y granodioritas de la Unidad Tres Lagunas.

Según las últimas actualizaciones de la información geológica local, Tamay (2004) establece que, sobre este basamento, se depositan las siguientes formaciones: *Fm. Trigal* constituida por areniscas y conglomerados; *Fm. La Banda* conformada por calizas masivas, lutitas carbonatadas y capas de Chert y areniscas; *Fm. Belén* caracterizada por areniscas de grano grueso y lentes de conglomerados; *Fm. San Cayetano* conformada por tres miembros: miembro inferior de areniscas, conglomerados y carbón; miembro intermedio por lutitas, diatomitas y algunos piroclastos; y el miembro superior por areniscas. *Fm. Quillollaco* presente al este y oeste de la cuenca y conformada por conglomerados con intercalaciones de areniscas; *Fm. Salapa* compuesta por clastos líticos y tobas; y, los *Depósitos Cuaternarios* que corresponden a sedimentos sin consolidar. En la Figura 2 se observa la geología local de la cuenca de Loja.

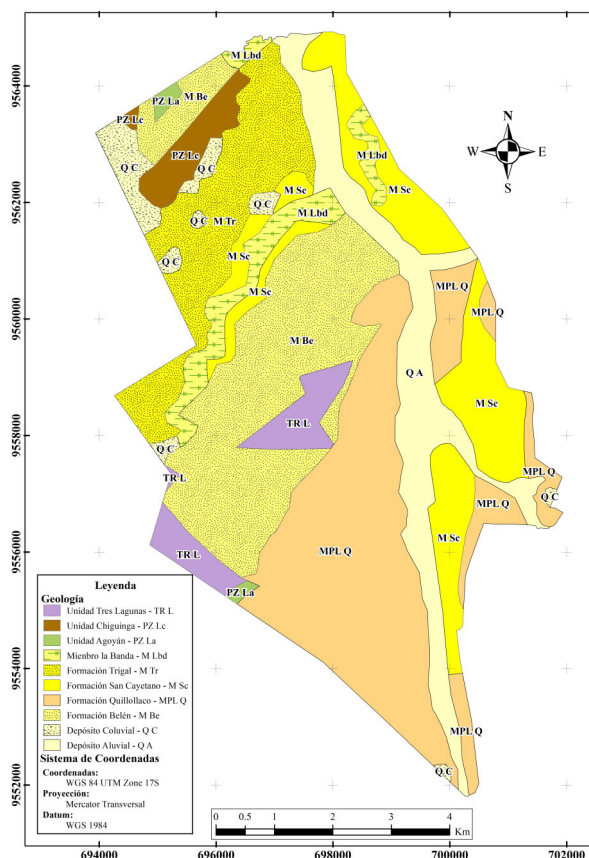


Figura 2. Geología de la cuenca de Loja – Ecuador

Fuente: Tamay (2004) modificado por los autores, 2025.

Distribución de los Periodos Fundamentales

El análisis de los 924 puntos de muestreo permitió caracterizar los periodos de vibración predominantes en la cuenca de Loja. La estadística descriptiva mostró un valor medio de 0.78 s, con una desviación estándar de 0.47 s. El periodo mínimo registrado fue cercano a 0.1 s, mientras que el máximo alcanzó valores superiores a 2.0 s, indicando una variabilidad significativa en la respuesta sísmica del subsuelo de la zona de estudio.

El histograma de la Figura 3 muestra la distribución de los períodos de vibración. Se observa que la mayoría de los valores se encuentran entre 0.2 s y 1.0 s, lo que sugiere una predominancia de suelos muy densos, roca blanda o meteorizada de profundidad intermedia hasta suelos rígidos profundos en la cuenca; eso en concordancia del ambiente sedimentario de la cuenca de Loja en la que tenemos desde depósitos aluviales (cuaternarios), pasando por roca sedimentaria terciaria, hasta llegar al sótano de la cuenca el cual corresponde a un basamento metamórfico alterado en sus primeros metros. Además, la dispersión de los datos indica la coexistencia de zonas con diferentes características litológicas que van desde materiales sueltos y compactos en zonas de valle a zonas con pendiente.

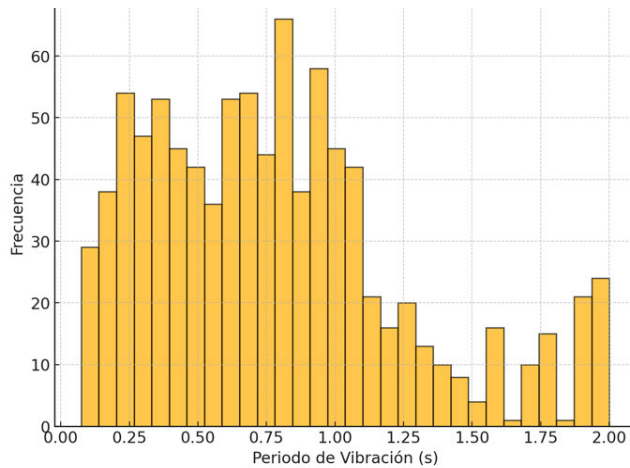


Figura 3. Distribución de los períodos de vibración en Loja, Ecuador
Fuente. Autores, 2026.

Los datos expuestos indican que la litología de la cuenca de Loja corresponde a un suelo tipo C de zonas del valle de la cuenca, y de tipo D para las zonas norte y de pendientes, según lo indica la NEC-15.

El diagrama de caja y bigotes de la Figura 4, permitió identificar la presencia de valores atípicos en la distribución de los períodos de vibración. Los valores más altos corresponden a zonas donde la litología indica depósitos sedimentarios profundos a blandos superficiales.

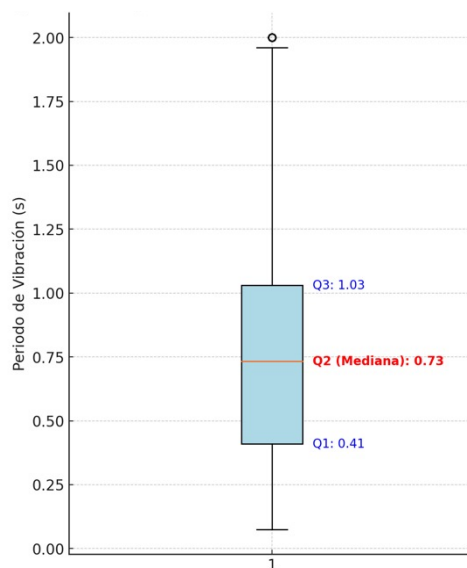


Figura 4. Diagrama de Caja y Bigotes de los períodos de vibración de Loja
Fuente. Autores, 2026.

A partir de estos resultados, se identificaron tres zonas principales en la cuenca de Loja: Zona de períodos cortos (≤ 0.2 s), asociada a afloramientos puntuales rocosos sedimentarios competentes que se encuentran dentro del primer cuartil (Primer Cuartil - 25%). Zona de períodos medios (0.2 s – 0.8 s): Predominante en la zona de valle de la cuenca, correspondiente a suelos

de densidad intermedia que varían desde aluviales hasta rocas sedimentarias que se encuentran dentro del tercer cuartil (Tercer Cuartil - 75%); y, zona de períodos largos (> 0.8 s), ubicada en el sector norte y zonas con pendiente al centro y sur de la cuenca con mayor basamento rocoso alterado o rocas sedimentarias de rigidez media profunda, o presencia de capas blandas superficiales.

Análisis de los Períodos de Vibración y Zonificación

Para analizar la relación entre los períodos y la ubicación geográfica, se generó un mapa de isolíneas en función de las coordenadas X (longitud) e Y (latitud) en el datum WGS 84 zona 17S, sobre la base urbanística de la ciudad de Loja. En la Figura 5 se observa una distribución heterogénea de los períodos fundamentales, con valores más altos en la zona norte y zonas con pendiente, lo que puede estar relacionado con estrato rocoso alterado o rocas sedimentarias de rigidez media profunda o presencia de capas blandas superficiales. En contraste, en la zona de valle al centro-sur de la cuenca de Loja, los períodos tienden a ser más cortos, reflejando el predominio de formaciones geológicas sedimentarias más compactas o de menor espesor.

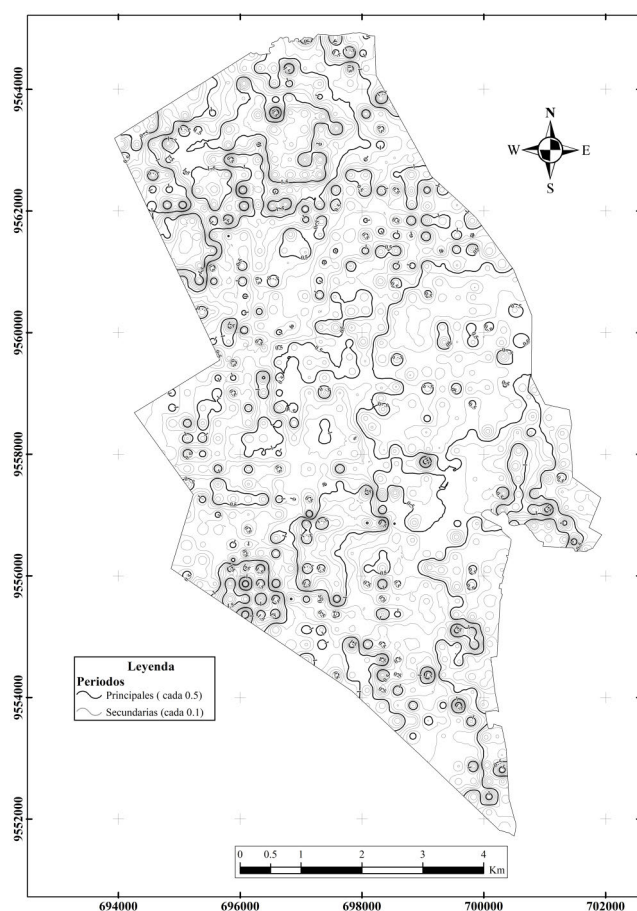


Fig. 5. Mapa de isoperíodos de vibración predominantes de la ciudad de Loja (segundos)
Fuente. Autores, 2026.

En base a la propuesta de clasificación de períodos de la Tabla 4, en la Figura 6, se muestra la zonificación de los períodos de vibración de la ciudad y cuenca de Loja, en el que se destacan los rangos medios y largos, con presencia pobre de períodos muy largos y cortos.

En la Figura 6, se obtiene como resultado que los períodos muy cortos ≤ 0.1 s corresponden a 17.2 Ha representan el 0.3% de la ciudad en la zona noreste; los períodos cortos ≤ 0.2 s corresponden a 86.9 Ha representan el 1.53% de la ciudad en el centro de la cuenca; períodos medios ≤ 0.8 s corresponden a 3169.4 Ha representan el 55.65% de la ciudad se extienden por el valle de la cuenca; y los períodos largos ≤ 1.4 s corresponden a 2424.5 Ha representa el 42.52% al norte, oeste y sur de la ciudad.

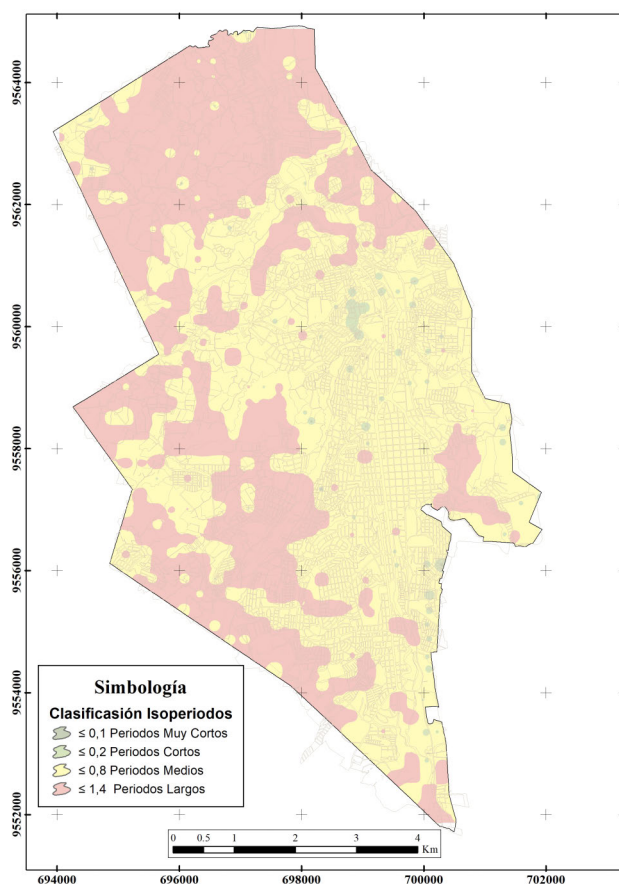


Fig. 6. Mapa de zonificación de periodos de vibración predominantes de la ciudad de Loja (segundos)
Fuente. Autores, 2026.

DISCUSIÓN

El estudio detallado de periodos fundamentales de vibración del suelo en la cuenca de Loja mediante el método Nakamura muestra periodos que varían predominantemente en el rango de 0.2 a 1.0 s, diferenciándose zonas de periodos medios gobernando la zona de valle, seguido de zonas de periodos largos que predominan la zona norte con apariciones menores en las otras zonas de pendiente y apariciones puntuales de área con periodos cortos.

Los resultados de Guartán (2010), mostraron predominantemente periodos medios entre (0.2 s – 0.8 s), con una media global de 0.35 s con mayor tendencia hacia 0.2 s, a partir de 72 puntos, con tiempo de grabación de 10 minutos, desde los 0.1 Hz. Rivera et al. (2013) obtuvo resultados con periodos en promedio largos (mayores a 0.8 s) a partir de 92 puntos, con tiempo de grabación de 10 minutos, desde los 0.1 Hz. Por otra parte, Castillo & González (2018) obtuvieron datos que variaron desde los 0.21 a 1.9 s, a partir de 40 puntos, con tiempo de grabación de 15 a 20 minutos.

Hasta este punto, los estudios anteriores no definen con claridad la caracterización dinámica del subsuelo de la cuenca de Loja correspondiente al periodo de vibración predominante del subsuelo, mostrando en cada estudio un aumento en el periodo fundamental obtenido.

Los resultados de esta investigación fueron contrastados con los estudios antes descritos en la cuenca de Loja, con la diferencia de utilizar un mallado sistemático de 250 x 250 m y tiempos de grabación superiores a 20 minutos desde los 0.1 Hz, proporcionando una caracterización más precisa de la variabilidad espacial de los periodos fundamentales, con mayor cercanía a los datos puros de Rivera et al. (2013) que son ligeramente más altos.

En la correlación con la información geotécnica y litológica existente confirma que los periodos más largos corresponden a rocas más blandas o de mayor espesor en terrenos con pendiente (Formación Belén, Formación Trigal y Unidad Chiguinda alterada), mientras que los periodos más cortos están relacionados con afloramientos de roca sedimentaria de menor espesor y depósitos aluviales en zona de valle (Formación Belén, Formación Quillollaco, Formación San Cayetano y Depósitos Aluviales), esto se puede evidenciar en la Figura 7.

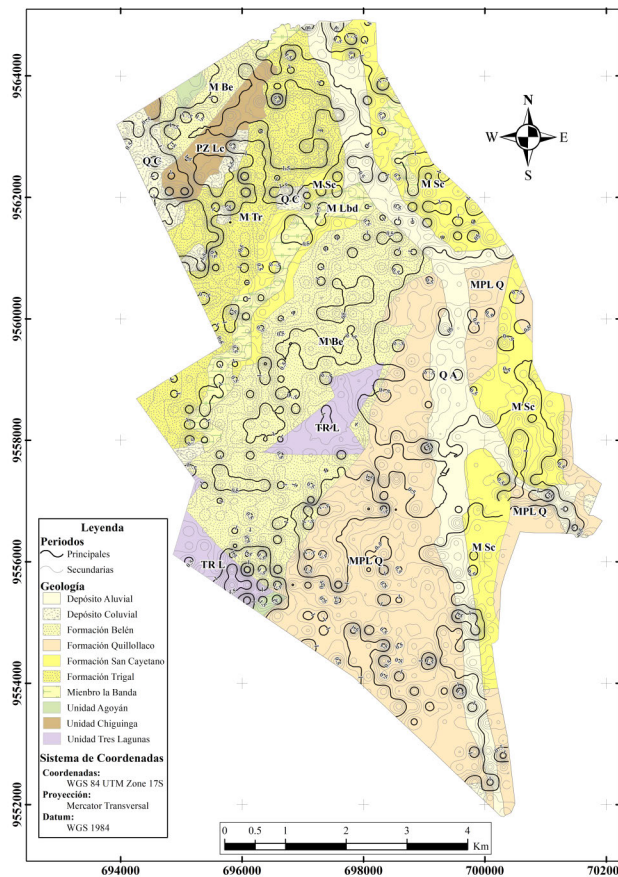


Fig. 7. Mapa de zonificación de periodos de vibración y correlación litológica
Fuente: Autores, 2026.

A partir del mapa detallado y definitivo de periodos de vibración del terreno de Loja de esta investigación, muestra una media de valores de 0.78 segundos en contraparte de la tendencia al alza de los periodos de vibración presentados por los estudios precedentes cuya media rondaba 1.0 segundos en general. Al mismo tiempo, se comprueba la correspondencia de periodos medios que corresponde a una litología de cuenca sedimentaria de roca blanda o meteorizada de profundidad intermedia hasta suelos rígidos profundos (Tipo C y D de la NEC-15), con una marcada influencia de la topografía.

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones directas en la planificación urbana y el diseño sismo-resistente en la ciudad de Loja. La zonificación obtenida puede ser utilizada como base para estudios de microzonificación sísmica, contribuyendo a la mitigación del riesgo sísmico en la ciudad. Además, los datos obtenidos pueden servir como referencia para futuros análisis de efectos de sitio y estudios de resonancia estructural, en los cuales los edificios con mayor riesgo serían los que posean alturas de 6 a 12 pisos para las zonas de periodos largos (conservadoramente zonas de pendientes) y alturas de 4 a 8 pisos para las zonas de periodos medios (zona de valle) asumiendo 0.1 s por piso ASCE 7 (Society of Civil Engineers, 2022).

Este estudio es el primer paso para obtener una microzonificación sísmica que contribuirá a la planificación urbana de la ciudad de Loja. Estudios posteriores deberán incorporar datos para la obtención de perfiles VS en contraste con datos geotécnicos o geofísicos empleando otras metodologías, para obtención del mapa de Vs30 y su consecuente clasificación litológica con fines de estudios sísmicos según la NEC-15. Además, empleando los datos de periodos de vibración y Vs30, en conjunto con el estudio de recurrencia sísmica, se puede obtener como resultado el mapa de peligro sísmico de Loja. En términos de investigación geológica, se puede profundizar en el estudio del basamento geotécnico de la cuenca de Loja ($Vs30 > 800$ m/s).

CONCLUSIONES

Se identifica los periodos fundamentales de vibración del suelo en la ciudad de Loja, Ecuador, empleando el método Nakamura. Se identificó valores predominantes que varían de 0.2 y 1.0s, con una media de 0.78 s, delimitando tres zonas sísmicas diferenciadas: periodos cortos en formaciones rocosas; periodos medios en zonas de valle; y periodos largos en el norte de la ciudad y zonas de pendiente. Como producto se obtiene un mapa detallado que contribuye a la microzonificación sísmica de Loja.

Los hallazgos de la investigación han permitido establecer con mayor precisión una relación clara entre la respuesta dinámica del suelo con la litología local y topografía del terreno. Además, se ha generado el mapa de zonificación de periodos fundamentales a detalle, lo que aporta significativamente a la microzonificación sísmica de Loja, así como a la planificación urbana y al diseño sismo resistente de la ciudad, ya que la litología local puede variar entre tipo C y D de acuerdo a la INEC-15.

La investigación confirmó la eficacia del método Nakamura en la caracterización sísmica de la ciudad de Loja. Se identificó tres zonas diferenciadas de respuesta sísmica y se validó su correspondencia con las condiciones geológicas locales. Las limitaciones de la metodología fueron el ruido urbano y posibles inferencias en los registros; sin embargo, sus aportes representan un avance significativo para mejorar la seguridad estructural y a desarrollar estrategias más efectivas para la mitigación de riesgo sísmico.

Los resultados de la presente investigación cimentarán la base para futuras investigaciones de microzonificación sísmica y efectos de sitio. Se prevé la integración de análisis de inversión de datos para obtener perfiles Vs30 y mapas de clasificación litológica-geotécnica. Así mismo, se plantea actualizar el mapa de peligro sísmico de Loja, lo que contribuirá a mejorar la seguridad estructural y a desarrollar estrategias más efectivas para la mitigación del riesgo sísmico en la ciudad.

REFERENCIAS

- ASCE/SEI 7-22: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures Society of Civil Engineers. (2022). ASCE/SEI 7-22: Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers.
- Bray, J. & Rodríguez-Marek, A. (1997). Geotechnical site categories. En *Proceeding of the First PEER-PG&E Workshop on Seismic Reliability of Utility Lifelines* (San Francisco. CA).
- Burjánek, J., Gischig, V., Moore, J. R., & Fäh, D. (2018). Ambient vibration characterization and monitoring of a rock slope close to collapse. *Geophysical Journal International*, 212(1), 297–310. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx424>
- Castillo, P., & González, F. (2018). *Zonificación de periodos fundamentales del suelo, mediante vibraciones ambientales, de la zona urbana en la cuenca de Loja, provincia de Loja-Ecuador*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja] Repositorio Institucional UNL. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/20998/1/Calder%C3%B3n%20Castillo%20Paulina%20Elizabeth.pdf>
- Derras, B., Bard, P. Y., & Cotton, F. (2017). VS30, slope, H800 and fo: Performance of various site-condition proxies in reducing ground-motion aleatory variability and predicting nonlinear site response 4. *Seismology. Earth, Planets and Space*, 69(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0718-z>
- Fiolleau, S., Jongmans, D., Bièvre, G., Chambon, G., Baillet, L., Vial, B., & Fiolleau, S. (2020). Seismic characterization of a clay-block rupture in Harmalière landslide, French Western Alps. *Geophysical Journal International*, 221(3), 1777–1788. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa050>
- Guartán, J. (2010). *Zonificación sísmica de la Cuenca de Loja (Ecuador), a partir de datos litológicos y medidas de ruido ambiental*. (Tesis de Maestría, Universidad de Granada). Repositorio Institucional UGR.
- Ibarra-Torúa, G., Acosta-Chang, J., & López-Pineda, L. (2015). *Microzonation of ground dominant periods at city of Ensenada, Baja California* *Microzonación de Periodos Dominantes del suelo la ciudad de Ensenada, Baja California* (Vol. 14, Issue 1).
- Kohler, M. D., Davis, P. M., & Safak, E. (2005). Earthquake and ambient vibration monitoring of the steel-frame UCLA factor building. *Earthquake Spectra*, 21(3), 715–736. <https://doi.org/10.1193/1.1946707>

- Mascandola, C., Massa, M., Barani, S., Albarello, D., Lovati, S., Martelli, L., & Poggi, V. (2019). Mapping the seismic bedrock of the Po plain (Italy) through ambient-vibration monitoring. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 164–177. <https://doi.org/10.1785/0120180193>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), Peligro Sísmico, parte 1*. República del Ecuador. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/2.-NEC-SE-DS-Peligro-Sismico-parte-1.pdf>
- Moho. (2023). Grilla (Versión 10.2) [Software]. MoHo s.r.l.
- Mora, M. M., Lesage, P., Dorel, J., Bard, P. Y., Métaxian, J. P., Alvarado, G. E., & Leandro, C. (2001). Study of seismic site effects using H/V spectral ratios at Arenal volcano, Costa Rica. *Geophysical Research Letters*, 28(15), 2991–2994. <https://doi.org/10.1029/2001GL013049>
- Motamed, R., Ghalandarzadeh, A., Tawhata, I., & Tabatabaei, S. H. (2007). Seismic microzonation and damage assessment of Bam City, Southeastern Iran. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(1), 110–132. <https://doi.org/10.1080/13632460601123164>
- Nakamura, Y. (1989). Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)*, 30(1), 25–33. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0024480933&partnerID=40&md5=2c0443caba17063be4e31173ab55208a>
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proceedings of the XII World Conference Earthquake Engineering, Paper no 2656*.
- Parajuli, H. R., Kiyono, J., Tatsumi, M., Suzuki, Y., Umemura, H., Taniguchi, H., Toki, K., Furukawa, A., & Maskey, P. N. (2011). Dynamic characteristic investigation of a historical masonry building and surrounding ground in Kathmandu. *Journal of Disaster Research*, 6(1), 26–35. <https://doi.org/10.20965/jdr.2011.p0026>
- Piña-Flores, J., Pertón, M., García-Jerez, A., Carmona, E., Luzón, F., Molina-Villegas, J. C., & Sánchez-Sesma, F. J. (2017). The inversion of spectral ratio H/V in a layered system using the diffuse field assumption (DFA). *Geophysical Journal International*, 208 (1), 577–588. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw416>
- Rivera, R., Salomé, K., Bernal, N., Luzuriaga, S., & Egverto, J. (2013). *Mapa de periodos predominantes del suelo del área urbana de la ciudad de Loja (Ecuador), obtenidos a partir de medidas de ruido ambiental*. <http://dspace.utpl.edu.ec/jspui/handle/123456789/8118>
- SESAME Project. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: Measurements, processing and interpretation* (SESAME European Research Project No. EVG1-CT-2000-00026). European Commission. <https://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>
- Tün, M., Pekkan, E., Özel, O., & Guney, Y. (2016). An investigation into the bedrock depth in the Eskisehir Quaternary Basin (Turkey) using the microtremor method. *Geophysical Journal International*, 207(1), 589–607. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw294>
- Ullah, S., Younas, S. W., Asim, M., Fahad, M., & Fahim, M. (2022). Site Effects Study in the Peshawar District using Seismic Noise. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(4), 751–764. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-04-010>
- Wibowo, N. B., Fathani, T. F., Pramumijoyo, S., & Marliyani, G. I. (2023). *Microzonation of seismic parameters in geological formation units along the opak river using microtremor measurements*. *International Journal of GEOMATE*, 25(110), 208–219. <https://doi.org/10.21660/2023.110.4017>
- Wood, C. M., Cox, B. R., Wotherspoon, L. M., & Green, R. A. (2011). *Dynamic site characterization of christchurch strong motion stations*. <http://www.geonet.org.nz>