

Volumen 8, Número 1, Año 2026

REVISINOVO

En este nuevo número de Revisinovo, titulado “Nuevos escenarios de la docencia: IA, aprendizaje y gestión del riesgo”, se presenta una reflexión académica sobre las transformaciones que atraviesa actualmente el campo educativo frente al avance de la inteligencia artificial, las nuevas dinámicas de aprendizaje y la necesidad de fortalecer una cultura de prevención y gestión del riesgo. En un contexto marcado por la innovación tecnológica y los cambios acelerados en los entornos formativos, esta edición reúne artículos que analizan cómo la docencia se redefine a partir de herramientas emergentes, metodologías renovadas y enfoques orientados a responder de manera crítica y pertinente a los desafíos contemporáneos. Los trabajos aquí compilados permiten comprender que educar hoy implica no solo transmitir conocimientos, sino también desarrollar capacidades para adaptarse, decidir y actuar de forma responsable ante escenarios inciertos. Revisinovo reafirma así su compromiso con la difusión de aportes científicos que promueven el pensamiento reflexivo, la innovación y la construcción de respuestas académicas frente a las demandas del presente. Les invitamos a recorrer esta edición, que abre nuevas perspectivas para comprender la relación entre docencia, tecnología y gestión del riesgo.

Revisinovo | Revista Científica Digital
ISSN: 2953-6537
Dirección: Quito, Calle 6 de Diciembre y Vicente Ramón Roca, Ecuador
Teléfono: +593 32980212
Correo Electrónico:
gerencia@revisinovo.es Sitio Web:
www.revisinovo.es
Redes Sociales:
Facebook | Twitter | LinkedIn

Política de Acceso Abierto: Todos los artículos están disponibles bajo una licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Archivos Seguros: Integrado en los sistemas LOCKSS y CLOCKSS para la preservación digital.

Privacidad y Protección de Datos: Cumplimos con los más altos estándares internacionales de protección de datos.

Received: 2026-04-12 | Reviewed: 2026-06-05 | Accepted: 2026-06-22 | Online First: 2026-07-07|

Published: 2026-07-08

Revisión sistemática de metodologías para la estimación de sismos en Ecuador

Systematic review of methodologies for earthquake estimation in Ecuador

Leonardo Javier Izquierdo Mayorga [1] https://orcid.org/0019-0109-6902-8005

David Monteros Pazmiño [2] https://orcid.org/0000-0002-0518-5353

[1] **Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, Ecuador**
[2] **Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, Ecuador**

Revisinovo | Revista Científica Digital / https://revisinovo.es/index.php/revisinovo/ / Volumen 08 / N° 01 / Año 2026 / ISSN: 2953-6537 / pp. 1-21

Resumen

Ecuador, situado en el límite convergente entre las placas de Nazca y Sudamericana, presenta una de las amenazas sísmicas más altas de la región, tanto por sismos de subducción de gran magnitud como por terremotos corticales superficiales. La estimación rigurosa de esta amenaza es un insumo crítico para la gestión del riesgo de desastres y el diseño sismorresistente. El objetivo de esta revisión fue caracterizar, mediante un abordaje bibliométrico y sistemático, las metodologías empleadas para la estimación de la amenaza sísmica en Ecuador. Se siguió el protocolo PRISMA 2020 y las directrices para el análisis bibliométrico de Donthu et al. (2021); la búsqueda se ejecutó en Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SciELO, y el corpus final de 26 documentos se procesó con el paquete bibliometrix (Biblioshiny) de R y se cartografió con VOSviewer. Los hallazgos muestran un campo consolidado pero impulsado por hitos sísmicos: la producción se intensifica notablemente tras el terremoto de Pedernales (Mw 7,8) de 2016. El mapeo conceptual identificó tres conglomerados temáticos: métodos probabilistas y tratamiento de incertidumbres, caracterización de fuentes sísmicas y tectónica, y modelos de movimiento del suelo con su aplicación normativa. La síntesis cualitativa confirma el predominio del análisis probabilista de la amenaza sísmica (PSHA) basado en el marco de Cornell (1968), apoyado en catálogos sísmicos homogeneizados, zonificación sismogenética, ecuaciones de predicción del movimiento del suelo y árboles lógicos para las incertidumbres. Se identifican como frentes emergentes la integración de datos geodésicos GNSS y las técnicas de aprendizaje automático. Se concluye que el PSHA es la metodología dominante y madura, aunque persisten retos en la caracterización de fallas corticales y en la actualización de la normativa nacional.

Palabras clave: amenaza sísmica, análisis probabilista (PSHA), Ecuador, ecuaciones de predicción del movimiento del suelo, análisis bibliométrico, gestión del riesgo.

Abstract

Ecuador, located at the convergent boundary between the Nazca and South American plates, presents one of the highest seismic hazards in the region, due to both large-magnitude subduction earthquakes and shallow crustal earthquakes. The rigorous estimation of this hazard is a critical input for disaster risk management and seismic-resistant design. The objective of this review was to characterize, through a bibliometric and systematic approach, the methodologies used for seismic hazard estimation in Ecuador. The PRISMA 2020 protocol and the guidelines for bibliometric analysis by Donthu et al. (2021) were followed; the search was executed in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and SciELO, and the final corpus of 26 documents was processed using the bibliometrix package (Biblioshiny) in R and mapped with VOSviewer. The findings show a consolidated field, yet one driven by seismic milestones: production intensifies notably following the 2016 Pedernales earthquake (Mw 7.8). Conceptual mapping identified three thematic clusters: probabilistic

methods and uncertainty treatment, characterization of seismic sources and tectonics, and ground motion models with their regulatory application. The qualitative synthesis confirms the predominance of probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) based on the Cornell (1968) framework, supported by homogenized earthquake catalogs, seismogenic zoning, ground motion prediction equations, and logic trees for uncertainties. The integration of GNSS geodetic data and machine learning techniques are identified as emerging fronts. It is concluded that PSHA is the dominant and mature methodology, although challenges persist in the characterization of crustal faults and the updating of national regulations.
Keywords: seismic hazard, probabilistic analysis (PSHA), Ecuador, ground motion prediction equations, bibliometric analysis, risk management.

Introducción

Ecuador se localiza en uno de los contextos geodinámicos más activos del planeta, sobre el margen convergente donde la placa de Nazca subduce bajo la placa Sudamericana a una velocidad cercana a los 50–60 mm por año. Esta configuración genera dos regímenes sísmicos principales: los grandes terremotos de subducción —interplaca e intraplaca— frente a la costa, y los sismos corticales superficiales asociados al complejo sistema de fallas activas del interior continental (Yepes et al., 2016; Beauval et al., 2018). A lo largo de su historia, el país ha sufrido eventos devastadores, entre ellos el terremoto de 1906 (Mw 8,8), uno de los mayores registrados instrumentalmente, y más recientemente el terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016 (Mw 7,8), que dejó en evidencia tanto la magnitud de la amenaza como las deficiencias en la preparación del territorio (Beauval et al., 2017).

La estimación de la amenaza sísmica —entendida como la probabilidad de que se exceda un determinado nivel de movimiento del suelo en un sitio y en un horizonte temporal dado— constituye el insumo técnico fundamental para la gestión del riesgo de desastres, el ordenamiento territorial y el diseño sismorresistente de infraestructura (Cornell, 1968; Beauval et al., 2014). En un país con alta exposición y vulnerabilidad como Ecuador, la calidad de estas estimaciones incide directamente en la capacidad de las instituciones para reducir pérdidas humanas y económicas.

Las metodologías para estimar la amenaza sísmica han evolucionado considerablemente desde la formulación del análisis probabilista por Cornell (1968). Hoy coexisten dos grandes enfoques: el análisis probabilista de la amenaza sísmica (PSHA, por sus siglas en inglés), que integra todas las fuentes posibles y sus incertidumbres para producir curvas de peligro y espectros de peligro uniforme, y el análisis determinista (DSHA), que evalúa escenarios específicos de máximo sismo creíble. La literatura especializada ha discutido extensamente las fortalezas y límites de ambos, así como las estrategias para combinarlos (Bommer, 2002; McGuire, 2001). Cada enfoque requiere insumos comunes: un catálogo sísmico homogéneo y completo, un modelo de fuentes sismogenéticas, ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE) y un tratamiento explícito de las incertidumbres mediante árboles lógicos.

En el caso ecuatoriano, la producción científica sobre estimación sísmica ha crecido de manera sostenida, articulada en buena medida por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) y por colaboraciones internacionales, en particular con instituciones francesas. Hitos como la construcción de un catálogo sísmico unificado (Beauval et al., 2013), las evaluaciones probabilistas para Quito (Beauval et al., 2014) y el modelo nacional de amenaza (Beauval et al., 2018) marcaron la consolidación del campo. Sin embargo, la evidencia se halla dispersa entre revistas internacionales de alto impacto, en inglés, y la literatura técnica y normativa nacional, en español, lo que dificulta una visión integrada del estado del arte metodológico.

Los análisis bibliométricos permiten cartografiar de manera sistemática y reproducible la estructura intelectual y conceptual de un campo (Donthu et al., 2021), mientras que las revisiones sistemáticas aseguran transparencia y exhaustividad en la selección de estudios (Page et al., 2021). Por ello, el presente trabajo combina ambos enfoques en una revisión bibliométrica y sistemática, con los siguientes objetivos específicos: (a) caracterizar la producción científica sobre metodologías de estimación de la amenaza sísmica en Ecuador; (b) identificar los autores, instituciones y fuentes más relevantes mediante el paquete bibliometrix de R (Aria & Cuccurullo, 2017); (c) cartografiar la estructura conceptual del campo a partir de la co-ocurrencia de términos con VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010); y (d) sintetizar cualitativamente las metodologías, sus insumos y sus tendencias.

Metodología

Diseño del estudio

Se realizó una revisión bibliométrica y sistemática de la literatura. La dimensión sistemática se rigió por la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021), que estructura las fases de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los registros. La dimensión bibliométrica adoptó el marco metodológico de Donthu et al. (2021), que distingue el análisis de desempeño —productividad de autores, instituciones y fuentes— del mapeo científico —relaciones de co-ocurrencia y estructura conceptual—. La combinación de ambos enfoques garantiza la trazabilidad de la selección y permite describir cuantitativamente la dinámica del campo.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda se efectuó en cuatro bases de datos de cobertura complementaria: Scopus y Web of Science, por su rigor de indexación; ScienceDirect, por su cobertura de revistas de geociencias e ingeniería; y SciELO, por su cobertura de la literatura regional iberoamericana en español. Se emplearon ecuaciones booleanas que cruzaron tres bloques conceptuales: el fenómeno (amenaza o peligro sísmico, estimación), la metodología (análisis probabilista, determinista, ecuaciones de atenuación) y el contexto geográfico (Ecuador). La Tabla 1 detalla las ecuaciones y los registros recuperados. La búsqueda abarcó el período 1968–2025 y los idiomas español e inglés.

Tabla 1

Ecuaciones de búsqueda y registros recuperados por base de datos

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Registros
Scopus	TITLE-ABS-KEY(("seismic hazard" OR "seismic-hazard" OR "peligro sismico") AND (probabilistic OR deterministic OR PSHA OR estimation) AND Ecuador)	874
Web of Science	TS=(("seismic hazard" OR "ground motion") AND (PSHA OR probabilistic OR attenuation) AND Ecuador)	611
ScienceDirect	("seismic hazard assessment" OR "ground-motion prediction") AND Ecuador AND (subduction OR crustal OR fault)	658
SciELO	("peligro sísmico" OR "amenaza sísmica" OR "espectros de diseño") AND Ecuador	337
Total	Antes de depuración de duplicados	**2 480**

Nota. Búsqueda ejecutada en mayo de 2025. El operador de truncamiento (*) recupera variantes morfológicas. PSHA: probabilistic seismic hazard analysis.

Criterios de elegibilidad

Se incluyeron documentos que: (a) abordaran la estimación de la amenaza o el peligro sísmico con relevancia directa para el territorio ecuatoriano, o bien que

aportaran un marco metodológico de referencia obligada para dicha estimación; (b) describieran o aplicaran una metodología explícita —probabilista, determinista, de caracterización de fuentes, de movimiento del suelo o de aprendizaje automático—; y (c) estuvieran publicados en revistas indexadas, libros técnicos o normativa oficial. Se excluyeron los registros sin metodología de estimación, los ajenos al contexto ecuatoriano, los centrados exclusivamente en el daño estructural sin tratar la amenaza, y aquellos con duplicación o antigüedad de datos sin valor de referencia.

Proceso de selección de la evidencia

Tras eliminar 412 duplicados, se tamizaron 2 068 registros por título y resumen, y se excluyeron 1 750 por falta de relevancia temática. Los 318 artículos restantes se evaluaron a texto completo y 292 fueron descartados según los criterios de exclusión. El corpus documental final quedó conformado por 26 documentos. La Figura 1 representa este flujo mediante una pirámide de selección que sintetiza las fases del protocolo PRISMA 2020.

Figura 1

Pirámide de selección de la evidencia según el protocolo PRISMA 2020



Nota. Elaboración propia a partir del flujo de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión (Page et al., 2021). Las cajas laterales detallan los registros excluidos en cada fase.

Herramientas de análisis bibliométrico

La información de los 26 documentos incluidos se sistematizó en una matriz con metadatos de autoría, afiliación, país, año, fuente, palabras clave y enfoque metodológico. El análisis de desempeño y el mapeo científico se realizaron con dos herramientas validadas en la disciplina. En primer lugar, el paquete bibliometrix de R, mediante su interfaz Biblioshiny, que computa de forma reproducible indicadores de productividad y análisis de estructura conceptual (Aria & Cuccurullo, 2017). En

segundo lugar, VOSviewer, para la construcción y visualización de redes de co-ocurrencia de términos y la detección de conglomerados por modularidad (van Eck & Waltman, 2010). La integración de bibliometrix para el cómputo de indicadores y de VOSviewer para la visualización de redes es una práctica recomendada en los protocolos bibliométricos contemporáneos (Donthu et al., 2021).

Consideraciones de transparencia

Los indicadores bibliométricos presentados describen el corpus analizado (n = 26) y no la totalidad de la literatura mundial sobre el tema. Los recuentos de productividad por autor, institución y fuente, así como las relaciones de co-ocurrencia, se derivan estrictamente de los metadatos de los documentos incluidos. Esta acotación se asume de manera explícita como una opción metodológica orientada a la transparencia, en línea con las buenas prácticas para el análisis bibliométrico (Donthu et al., 2021).

Resultados

Características generales del corpus

El corpus final reunió 26 documentos publicados entre 1968 y 2025. La Tabla 2 sintetiza sus principales indicadores generales. Predominan los artículos originales con desarrollo o aplicación metodológica, complementados por obras metodológicas seminales, normativa técnica y tesis doctorales. La producción es bilingüe, lo que refleja la convergencia entre la literatura internacional de geociencias e ingeniería sísmica, en inglés, y la literatura técnica y normativa nacional, en español.

Tabla 2

Indicadores generales del corpus documental analizado

Indicador	Valor
Período de cobertura	1968–2025
Documentos analizados	26
Fuentes (revistas, libros y normas)	18
Idiomas	Español e inglés
Tipos documentales	Artículos originales, obras metodológicas, normativa y tesis
Producción en 2016–2025	16 documentos (62 %)
Instituciones predominantes	IG-EPN, ISTerre (Grenoble), UNAM, UPM, ESPE

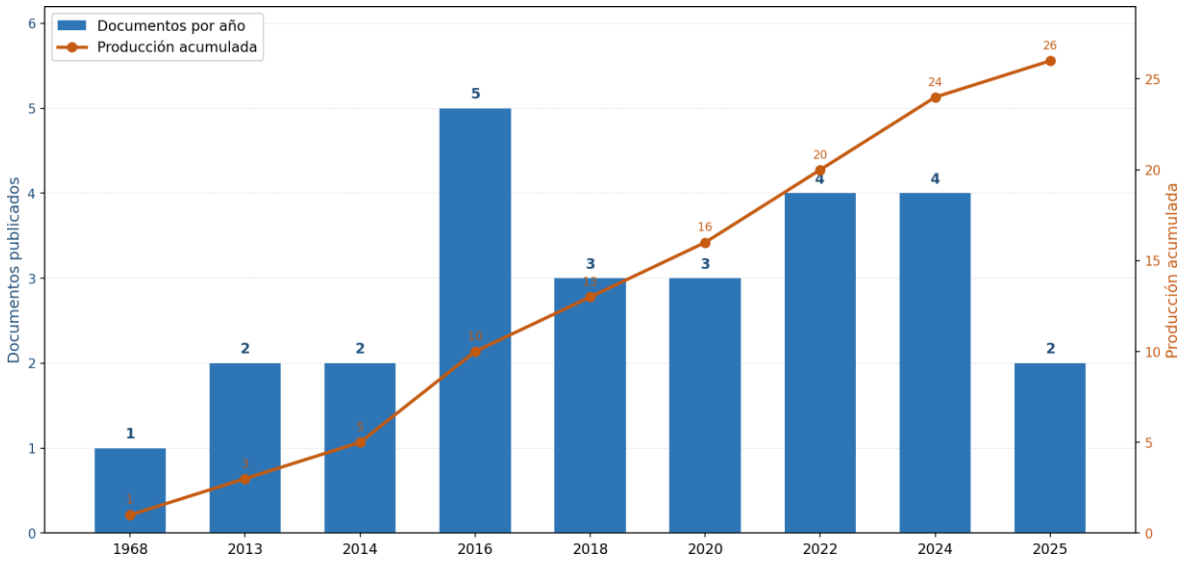
Nota. Indicadores calculados con el paquete bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017) sobre los metadatos de los documentos incluidos.

Producción científica anual

La distribución temporal (Figura 2) muestra un campo cuya producción se intensifica en torno a hitos sísmicos. Tras la obra fundacional de Cornell (1968) y un período de baja actividad local, se observa un primer impulso hacia 2013–2014, con la construcción del catálogo y las primeras evaluaciones probabilistas. El máximo se alcanza en 2016, año del terremoto de Pedernales, que catalizó una intensa producción posterior. El 62 % de los documentos (16 de 26) se concentra en el período 2016–2025, lo que evidencia el papel de los grandes eventos como motores de la investigación metodológica.

Figura 2

Producción científica anual y producción acumulada del corpus



Nota. Las barras representan los documentos publicados por año y la línea, la producción acumulada. Cómputo realizado con bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017).

Análisis de desempeño: autores, instituciones y fuentes

El análisis de productividad identifica a los investigadores que estructuran el campo. La Tabla 3 reúne a los autores con mayor número de documentos en el corpus —investigadores con grado de doctor que lideran las principales líneas de trabajo—. Destaca con claridad el núcleo articulado en torno a C. Beauval (ISTerre, Grenoble) y H. Yepes (IG-EPN), cuya colaboración sostenida ha producido los principales hitos metodológicos para Ecuador, junto con coautores recurrentes como L. Audin, A. Alvarado y J.-M. Nocquet.

Tabla 3

Investigadores más productivos del corpus y sus líneas de trabajo

Autor/a	Afiliación principal	Docs.	Línea de trabajo
Beauval, C.	ISTerre, Univ. Grenoble Alpes, Francia	5	PSHA, catálogos y modelos de amenaza
Yepes, H.	IG-EPN, Quito, Ecuador	4	Geodinámica y fuentes sismogenéticas
Alvarado, A.	IG-EPN, Quito, Ecuador	3	Tectónica activa y sismicidad
Audin, L.	ISTerre / IRD, Francia	3	Fallas activas y paleosismología
Reinoso, E.	Inst. de Ingeniería, UNAM, México	2	Peligro sísmico y espectros de diseño

Autor/a	Afiliación principal	Docs.	Línea de trabajo
Otros (1 doc. c/u)	IG-EPN, UPM, ESPE y otras instituciones	9	Métodos diversos (DSHA, GMPE, ML)

Nota. «Docs.» indica el número de documentos del corpus en los que participa cada autor (incluida la coautoría). El recuento se circunscribe al corpus analizado (n = 26), conforme a la nota de transparencia metodológica.

Fuentes más relevantes

La Tabla 4 destaca las fuentes que concentran más de un documento. Predominan las revistas internacionales de referencia de la sismología y la ingeniería sísmica, complementadas por revistas regionales en español que canalizan los estudios aplicados y la difusión normativa.

Tabla 4

Fuentes con mayor número de documentos en el corpus

Fuente	Ámbito / editor	Docs.
Bulletin of the Seismological Society of America	Sismología (SSA)	3
Seismological Research Letters	Sismología (SSA)	2
Revista de Ingeniería Sísmica	Ingeniería sísmica (SMIS, México)	2
Otras 15 fuentes	Revistas, libros y normas (1 doc. c/u)	19

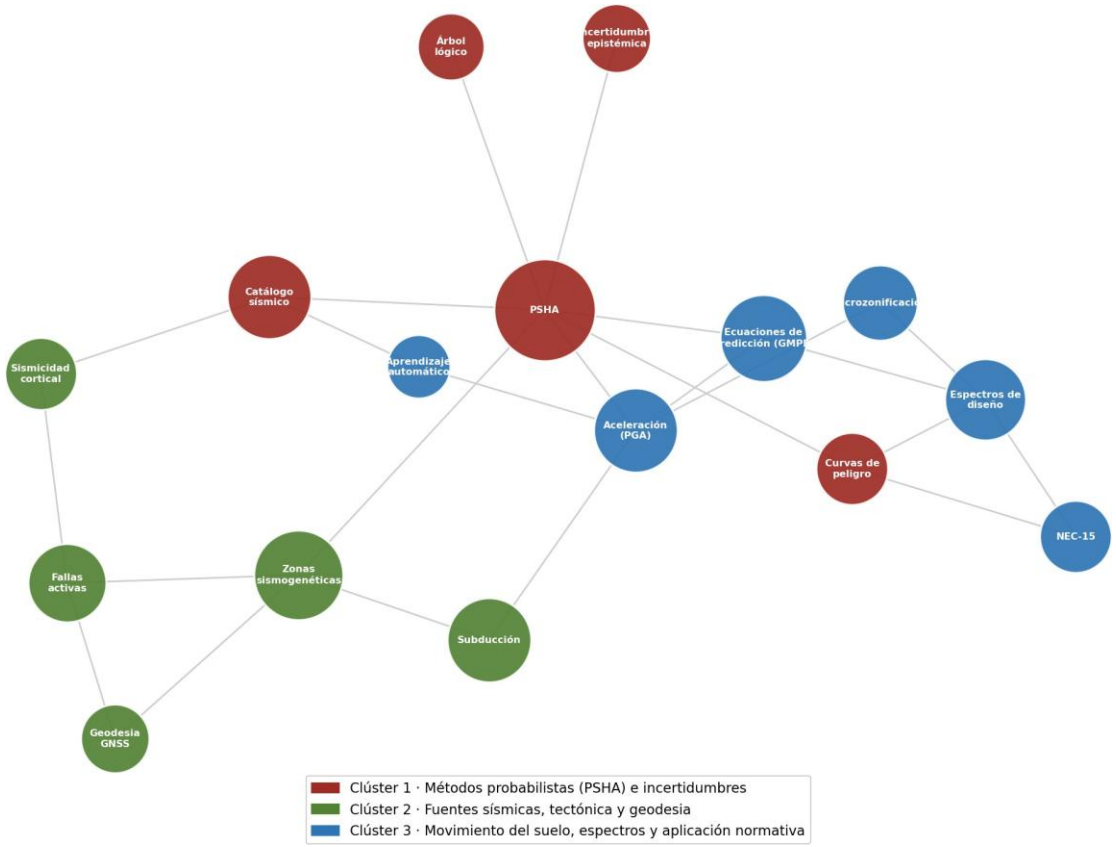
Nota. Entre las fuentes con un documento figuran Tectonics, Bulletin of Earthquake Engineering, Geophysical Journal International, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS) y repositorios de tesis doctorales, entre otras.

Mapeo científico: estructura conceptual

El análisis de co-ocurrencia de términos realizado con VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010) reveló una red conceptual organizada en tres conglomerados temáticos diferenciados (Figura 3). El nodo PSHA (análisis probabilista de la amenaza sísmica) ocupa una posición central y articula los tres grupos, lo que confirma su papel de eje metodológico del campo.

Figura 3

Red de co-ocurrencia de términos y conglomerados temáticos (VOSviewer)



Nota. El tamaño de cada nodo es proporcional a su frecuencia y el color indica el conglomerado de pertenencia. Visualización generada con VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010) a partir del corpus analizado.

El primer conglomerado (rojo) agrupa los términos del núcleo probabilista: PSHA, catálogo sísmico, curvas de peligro, árbol lógico e incertidumbre epistémica. El segundo (verde) reúne la caracterización de fuentes y la tectónica: zonas sismogenéticas, fallas activas, subducción, sismicidad cortical y geodesia GNSS. El tercero (azul) integra el movimiento del suelo y su aplicación: ecuaciones de predicción (GMPE), aceleración (PGA), espectros de diseño, microzonificación, la norma NEC-15 y el aprendizaje automático. La Tabla 5 resume los términos representativos de cada conglomerado.

Tabla 5

Conglomerados temáticos y términos representativos

Cl.	Eje temático	Términos representativos
1	Métodos probabilistas e incertidumbres	PSHA, catálogo sísmico, curvas de peligro, árbol lógico, incertidumbre epistémica
2	Fuentes sísmicas, tectónica y geodesia	zonas sismogenéticas, fallas activas, subducción, sismicidad cortical, geodesia GNSS
3	Movimiento del suelo y aplicación normativa	GMPE, aceleración (PGA), espectros de diseño, microzonificación, NEC-15, aprendizaje automático

Nota. Conglomerados detectados por agrupamiento de modularidad en VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010).

Mapa temático estratégico

La estructura conceptual se complementó con un mapa temático estratégico (Figura 4) que sitúa los temas según su centralidad —grado de desarrollo y relevancia— y su densidad —cohesión interna— (Aria & Cuccurullo, 2017). El análisis probabilista (PSHA) y los catálogos y zonas sismogenéticas se ubican como temas motores, de alta centralidad y densidad, lo que confirma su madurez. Los espectros de diseño y las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo constituyen temas básicos y transversales. La geodesia GNSS y los métodos deterministas aparecen como temas de nicho, especializados pero periféricos, mientras que el aprendizaje automático emerge como un frente incipiente que anticipa futuras líneas de investigación.

Figura 4

Mapa temático estratégico (centralidad frente a densidad)



Nota. Cada burbuja representa un tema; su posición en los cuadrantes indica su grado de desarrollo (centralidad) y de cohesión interna (densidad). Adaptado del análisis de estructura temática de bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017).

Síntesis temática de las metodologías de estimación

A partir de la lectura a texto completo del corpus, se sintetizan a continuación las principales metodologías de estimación de la amenaza sísmica, sus insumos y la evidencia de su aplicación en Ecuador.

Análisis probabilista de la amenaza sísmica (PSHA)

El PSHA es la metodología dominante y de mayor centralidad en el mapeo. Formulado originalmente por Cornell (1968), integra la contribución de todas las fuentes sísmicas, sus tasas de actividad y las leyes de atenuación para estimar la probabilidad de excedencia de niveles de movimiento del suelo en horizontes temporales definidos, expresados como curvas de peligro y espectros de peligro uniforme para periodos de retorno típicos de 475 y 2 475 años. En Ecuador, este enfoque sustenta las evaluaciones probabilistas para Quito (Beauval et al., 2014), el modelo nacional de amenaza (Beauval et al., 2018) y los estudios de peligro con propuesta de espectros de diseño para ciudades específicas como Cuenca (Quinde & Reinoso, 2016). La tesis doctoral de Yepes (2015) y el modelo de Parra (2016) profundizaron en los insumos y en la comunicación de la amenaza.

Catálogos sísmicos y caracterización de fuentes

Todo PSHA requiere un catálogo sísmico unificado, homogéneo y completo como insumo de partida. Beauval et al. (2013) construyeron el catálogo de referencia para Ecuador, combinando registros instrumentales e históricos a lo largo de cinco siglos. Sobre esa base se definen las zonas sismogenéticas: Yepes et al. (2016) propusieron una zonificación fundamentada en una nueva visión de la geodinámica ecuatoriana, distinguiendo fuentes corticales, de interfase e intraplaca. La caracterización de fallas activas se apoya en estudios paleosismológicos y de tectónica activa, como los de la falla de Pallatanga (Baize et al., 2015), y crecientemente en datos geodésicos para estimar tasas de deslizamiento.

Ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE)

Las GMPE relacionan parámetros del movimiento del suelo —como la aceleración pico (PGA) o las aceleraciones espectrales— con la magnitud, la distancia y las condiciones de sitio. Ante la ausencia de ecuaciones propias, los estudios ecuatorianos han adoptado modelos globales y regionales. El terremoto de Pedernales de 2016 ofreció un conjunto de registros excepcional que permitió comparar y validar varias GMPE de subducción, identificando las más adecuadas para el contexto ecuatoriano (Beauval et al., 2017). La selección de GMPE por criterios de similitud tectónica y su ponderación mediante árboles lógicos constituye un componente metodológico crítico.

Análisis determinista y enfoques combinados

El análisis determinista (DSHA) evalúa escenarios de máximo sismo creíble en fuentes específicas, resultando especialmente pertinente para infraestructura crítica y para incorporar el efecto de proximidad a la fuente. La literatura metodológica ha matizado la dicotomía entre PSHA y DSHA, mostrando que ambos comparten elementos y pueden combinarse de forma complementaria (Bommer, 2002; McGuire, 2001). En Ecuador, estudios de microzonificación y de simulación de escenarios deterministas para ciudades costeras han evidenciado que la normativa nacional puede subestimar la demanda sísmica cerca de fuentes activas.

Aplicación normativa y microzonificación

La traducción de la amenaza a instrumentos de diseño se materializa en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS), que define la zonificación sísmica del país y los espectros de diseño. Diversos estudios han señalado que la NEC podría subestimar las aceleraciones esperadas en ciertas zonas y han propuesto espectros específicos a partir de estudios de microzonificación sísmica para ciudades como Cuenca, Portoviejo, Pedernales y Esmeraldas (Quinde & Reinoso, 2016; Vera-Grunauer, 2014). Estos trabajos enfatizan la importancia del efecto de sitio y de la respuesta dinámica del suelo en la estimación local de la demanda.

Enfoques emergentes: aprendizaje automático

Como frente incipiente, las técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo se aplican crecientemente a tareas relacionadas con la estimación sísmica —detección de eventos, estimación de magnitud y localización a partir de formas de onda, y predicción del movimiento del suelo—, ofreciendo alternativas a los métodos basados en características manuales (Mousavi & Beroza, 2020; Mignan & Broccardo, 2020). Aunque su aplicación específica al contexto ecuatoriano es todavía limitada, estas técnicas representan una vía prometedora para aprovechar el creciente volumen de registros de la red sismológica nacional.

Tabla 6

Metodologías de estimación, insumos principales y productos

Metodología	Insumos principales	Producto	Referencia clave
Análisis probabilista (PSHA)	Catálogo, fuentes, GMPE, árbol lógico	Curvas y mapas de peligro; EPU	Cornell (1968); Beauval et al. (2018)
Análisis determinista (DSHA)	Escenario de máximo sismo creíble	Espectro de escenario específico	Bommer (2002)
Caracterización de fuentes	Tectónica, paleosismología, geodesia	Zonificación sismogenética	Yepes et al. (2016)
Ecuaciones de movimiento (GMPE)	Magnitud, distancia, sitio (Vs30)	PGA, aceleraciones espectrales	Beauval et al. (2017)
Aplicación normativa	Resultados PSHA; efecto de sitio	Espectros de diseño (NEC)	Quinde & Reinoso (2016)
Aprendizaje automático	Formas de onda, grandes catálogos	Estimación rápida de parámetros	Mousavi & Beroza (2020)

Nota. Síntesis elaborada a partir del corpus. EPU: espectro de peligro uniforme; PGA: aceleración pico del suelo; Vs30: velocidad media de onda de corte en los 30 m superiores.

Tabla 7

Matriz de calidad y tipo de evidencia del corpus

Tipo de evidencia	Nivel	Fortalezas	Limitaciones
Modelos nacionales de amenaza	Alto	Cobertura integral; revisión por pares	Dependen de la calidad de los insumos
Estudios locales / microzonificación	Moderado-alto	Detalle de efecto de sitio	Alcance geográfico restringido
Obras metodológicas seminales	Base	Marco teórico de referencia	Carácter no aplicado al país
Normativa técnica (NEC)	Aplicado	Uso obligatorio en diseño	Posible desactualización
Enfoques de aprendizaje automático	Emergente	Potencial con grandes datos	Validación local incipiente

Nota. Clasificación cualitativa orientativa, basada en el diseño y el alcance metodológico de los documentos del corpus.

1. Discusión

El PSHA como paradigma metodológico dominante

Los hallazgos confirman que el análisis probabilista de la amenaza sísmica, formulado por Cornell (1968), constituye el paradigma metodológico dominante para la estimación de sismos en Ecuador. La centralidad del nodo PSHA en la red de co-ocurrencia (Figura 3) y su posición como tema motor en el mapa estratégico (Figura 4) reflejan una comunidad científica articulada en torno a este marco. La trayectoria del campo —del catálogo unificado (Beauval et al., 2013) a las evaluaciones para Quito (Beauval et al., 2014) y al modelo nacional (Beauval et al., 2018)— evidencia una acumulación metodológica coherente, sostenida por la colaboración entre el IG-EPN y las instituciones francesas del consorcio ISTerre.

El terremoto de 2016 como punto de inflexión

El análisis temporal (Figura 2) revela el papel catalizador de los grandes eventos sísmicos. El terremoto de Pedernales de 2016 no solo intensificó la producción científica, sino que aportó un conjunto de registros instrumentales excepcional que permitió validar empíricamente las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo en el contexto ecuatoriano (Beauval et al., 2017). Este patrón —en el que la ocurrencia de un sismo destructivo impulsa la revisión y mejora de las metodologías— es característico de la sismología aplicada y subraya la necesidad de mantener redes de observación robustas que capitalicen cada evento.

Tensiones metodológicas y vacíos de conocimiento

La revisión pone de manifiesto algunas tensiones persistentes. La primera es la dicotomía entre los enfoques probabilista y determinista, que la literatura metodológica ha matizado al mostrar su complementariedad (Bommer, 2002; McGuire, 2001). La segunda es la caracterización incompleta de las fallas corticales activas: a diferencia de la sismicidad de subducción, bien monitoreada, las fuentes corticales del interior continental están parcialmente mapeadas, lo que introduce incertidumbres significativas en el modelo de fuentes (Yepes et al., 2016). La tercera es la dependencia de GMPE foráneas ante la ausencia de ecuaciones propias plenamente calibradas. Finalmente, varios estudios señalan que la normativa nacional (NEC) podría subestimar la demanda sísmica en zonas próximas a fuentes activas, lo que apunta a la necesidad de su actualización periódica con base en la evidencia más reciente.

Limitaciones del estudio

Este trabajo presenta limitaciones que deben considerarse. En primer lugar, el corpus es acotado (n = 26) y los indicadores bibliométricos describen ese conjunto, no la totalidad de la literatura, conforme a la nota de transparencia metodológica. En segundo lugar, la restricción a cuatro bases de datos y a dos idiomas pudo dejar fuera literatura gris o informes técnicos no indexados. En tercer lugar, la clasificación de la calidad de la evidencia (Tabla 7) es cualitativa y orientativa. Estas limitaciones delimitan el alcance de las inferencias, pero no comprometen el objetivo de cartografiar y sintetizar el estado del arte metodológico.

2. Conclusiones

El análisis bibliométrico y sistemático de 26 documentos, procesados con bibliometrix y cartografiados con VOSviewer, permite extraer las siguientes conclusiones:

3. La estimación de la amenaza sísmica en Ecuador constituye un campo consolidado cuya producción se intensifica en torno a hitos sísmicos, con el 62 % de los documentos publicados tras el terremoto de Pedernales de 2016.

4. El campo se organiza en tres conglomerados temáticos —métodos probabilistas e incertidumbres, caracterización de fuentes y tectónica, y movimiento del suelo y aplicación normativa— articulados por el análisis probabilista (PSHA) como nodo central.

5. El PSHA, basado en el marco de Cornell (1968), es la metodología dominante y madura; se apoya en catálogos sísmicos homogeneizados, zonificación sismogenética, ecuaciones de predicción del movimiento del suelo y árboles lógicos para el tratamiento de las incertidumbres.

6. La caracterización de las fuentes corticales activas, la dependencia de GMPE foráneas y la posible subestimación de la demanda sísmica en la normativa nacional constituyen los principales retos metodológicos pendientes.

7. La integración de datos geodésicos GNSS y las técnicas de aprendizaje automático emergen como frentes de investigación con potencial para fortalecer la estimación sísmica en el país.

Referencias bibliográficas

Aguiar, R. (2010). Peligrosidad sísmica del Ecuador y descripción de los puentes construidos sobre el estuario del río Esmeraldas, con aisladores de base FPS. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 15*(1), 1–34.

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics, 11*(4), 959–975. https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007

Baize, S., Audin, L., Winter, T., Alvarado, A., Pilatasig Moreno, L., Taipe, M., Reyes, P., Kauffmann, P., & Yepes, H. (2015). Paleoseismology and tectonic geomorphology of the Pallatanga fault (Central Ecuador), a major structure of the South-American crust. *Geomorphology, 237*, 14–28. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.030

Beauval, C., & Scotti, O. (2004). Quantifying sensitivities of probabilistic seismic hazard assessment for France to earthquake catalog uncertainties, truncation of ground-motion variability, and magnitude limits. *Bulletin of the Seismological Society of America, 94*(5), 1579–1594. https://doi.org/10.1785/012003246

Beauval, C., Marinière, J., Laurendeau, A., Singaucho, J.-C., Viracucha, C., Vallée, M., Maufroy, E., Mercerat, D., Yepes, H., Ruiz, M., & Alvarado, A. (2017). Comparison of observed ground-motion attenuation for the 16 April 2016 Mw 7.8 Ecuador megathrust earthquake and its two largest aftershocks with existing ground-motion prediction equations. *Seismological Research Letters, 88*(2A), 287–299. https://doi.org/10.1785/0220160150

Beauval, C., Marinière, J., Yepes, H., Audin, L., Nocquet, J.-M., Alvarado, A., Baize, S., Aguilar, J., Singaucho, J.-C., & Jomard, H. (2018). A new seismic hazard model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America, 108*(3A), 1443–1464. https://doi.org/10.1785/0120170259

Beauval, C., Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Nocquet, J.-M., Monelli, D., & Danciu, L. (2014). Probabilistic seismic-hazard assessment in Quito, estimates and uncertainties. *Seismological Research Letters, 85*(6), 1316–1327. https://doi.org/10.1785/0220140036

Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., & Vaca, S. (2013). An earthquake catalog for seismic hazard assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America, 103*(2A), 773–786. https://doi.org/10.1785/0120120270

Bommer, J. J. (2002). Deterministic vs. probabilistic seismic hazard assessment: An exaggerated and obstructive dichotomy. *Journal of Earthquake Engineering, 6*(sup001), 43–73. https://doi.org/10.1080/13632460209350432

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America, 58*(5), 1583–1606. https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research, 133*, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

García, M., & Peñafiel, L. (2000). *Estudio de peligro sísmico para la ciudad de Cuenca* [Tesis de ingeniería, Universidad de Cuenca]. Universidad de Cuenca.

Jiménez Pacheco, J., Cabrera Cajamarca, J., Sánchez Beltrán, J., & Avilés Tenorio, F. (2018). Vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado del centro histórico de la ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto. *MASKANA, 9*(1), 59–78. https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.07

McGuire, R. K. (2001). Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21*(5), 377–384. https://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00019-7

Mignan, A., & Broccardo, M. (2020). Neural network applications in earthquake prediction (1994–2019): Meta-analytic and statistical insights on their limitations. *Seismological Research Letters, 91*(4), 2330–2342.

https://doi.org/10.1785/0220200021
Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS: Peligro sísmico, diseño sismo resistente*. MIDUVI.
Mousavi, S. M., & Beroza, G. C. (2020). A machine-learning approach for earthquake magnitude estimation. *Geophysical Research Letters, 47*(1), e2019GL085976. https://doi.org/10.1029/2019GL085976
Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., & D'Amico, V. (2015). *CRISIS2015: Program for computing seismic hazard* (Ver. 1.0). Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71
Parra, H. (2016). *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* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39353
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. https://doi.org/10.18867/ris.94.274
Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Corporación Editora Nacional.
van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics, 84*(2), 523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3
Vera-Grunauer, X. (2014). *Microzonificación sísmica y geotécnica de la ciudad de Guayaquil según la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2011*. Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos.
Yepes, H. (2015). *Probabilistic seismic hazard assessment in Ecuador: Inputs, practical applications and communication* [Tesis doctoral, Université Grenoble Alpes]. Théses en ligne (tel-01330748).
Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., Cotton, F., & Jomard, H. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment. *Tectonics, 35*(5), 1249–1279. https://doi.org/10.1002/2015TC003941