



Tendencias Globales en el uso de Inteligencia Artificial para la predicción de deslizamientos de tierra: Una Revisión Bibliométrica

Global Trends in the Use of Artificial Intelligence for Landslide Prediction: A Bibliometric Review

Tendências globais no uso de inteligência artificial para a previsão de deslizamentos de terras: uma revisão bibliométrica

Christopher Gabriel Espinosa Ruiz ^I

cespinosa@ueb.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0785-109X>

Verónica Susana Sánchez Velastegui ^{II}

veronicas.sanchez@ueb.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8673-0826>

Correspondencia: cespinosa@ueb.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 26 de marzo de 2025 * **Aceptado:** 24 de abril de 2025 * **Publicado:** 11 de mayo de 2025

- I. Magíster en Gestión Empresarial basado en Métodos Cuantitativos en la Universidad Técnica de Ambato, Ingeniero en Comercio Exterior en Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Docente de la Universidad Estatal de Bolívar de la Facultad de Ciencias de la Salud y del Ser Humano Carrera de Ingeniería en Riesgos de Desastres, Guaranda, Ecuador.
- II. Magíster en Pedagogía de las Ciencias Experimentales mención Química y Biología de la Universidad Nacional de Chimborazo, Licenciado en Ciencias de la Educación mención Químico Biológicas de la Universidad Técnica Particular de Loja, Docente de la Universidad Estatal de Bolívar de la Facultad de Ciencias de la Educación, Sociales, Filosóficas y Humanísticas de la Carrera de Pedagogía de Matemáticas y de la Física,

Resumen

Los deslizamientos de tierra representan una de las amenazas naturales más frecuentes y destructivas a nivel global, exacerbada por el cambio climático y la expansión urbana no planificada. Ante este escenario, el uso de técnicas de inteligencia artificial (IA) ha emergido como una alternativa poderosa para la predicción de zonas susceptibles a deslizamientos. El presente estudio tuvo como objetivo analizar las tendencias globales en la investigación sobre la aplicación de IA en la predicción de deslizamientos de tierra, mediante una revisión sistemática con enfoque bibliométrico de artículos indexados en Scopus entre 2020 y 2024. Se aplicó el protocolo PRISMA y se utilizó el paquete bibliometrix en RStudio para procesar un total de 118 documentos que cumplieron criterios de calidad e impacto. Los resultados revelan una concentración temática en torno a técnicas como Random Forest, Support Vector Machine (SVM), redes neuronales artificiales y redes neuronales convolucionales, destacándose también el uso creciente de modelos híbridos. La producción científica se ha desarrollado principalmente en Asia y Europa, con escasa representación en América Latina y África. Si bien se han logrado avances importantes en precisión predictiva y modelado geoespacial, persisten desafíos relacionados con la interpretación de los modelos, la equidad geográfica en la investigación y la integración efectiva de estas herramientas en políticas de gestión del riesgo. Este estudio aporta una visión consolidada del estado del arte y constituye un referente útil para investigadores, tomadores de decisiones y planificadores territoriales comprometidos con la reducción del riesgo de desastres mediante tecnologías basadas en inteligencia artificial.

Palabras Clave: deslizamientos de tierra; inteligencia artificial; predicción; bibliometría; aprendizaje automático.

Abstract

Landslides represent one of the most frequent and destructive natural hazards globally, exacerbated by climate change and unplanned urban expansion. Given this scenario, the use of artificial intelligence (AI) techniques has emerged as a powerful alternative for predicting areas susceptible to landslides. This study aimed to analyze global trends in research on the application of AI in landslide prediction through a systematic review using a bibliometric approach of articles indexed in Scopus between 2020 and 2024. The PRISMA protocol was applied and the bibliometrix package in RStudio was used to process a total of 118 documents that met quality and impact

criteria. The results reveal a thematic concentration around techniques such as Random Forest, Support Vector Machine (SVM), artificial neural networks, and convolutional neural networks, with the increasing use of hybrid models also being highlighted. Scientific production has developed mainly in Asia and Europe, with limited representation in Latin America and Africa. While significant advances have been made in predictive accuracy and geospatial modeling, challenges persist related to model interpretation, geographic equity in research, and the effective integration of these tools into risk management policies. This study provides a consolidated overview of the state of the art and constitutes a useful reference for researchers, decision-makers, and territorial planners committed to disaster risk reduction through artificial intelligence-based technologies.

Keywords: Landslides; artificial intelligence; prediction; bibliometrics; machine learning.

Resumo

Os deslizamentos de terras representam um dos perigos naturais mais frequentes e destrutivos do mundo, agravados pelas alterações climáticas e pela expansão urbana não planeada. Perante este cenário, a utilização de técnicas de inteligência artificial (IA) surge como uma alternativa poderosa para prever áreas suscetíveis a deslizamentos de terras. O presente estudo teve como objetivo analisar as tendências globais na investigação sobre a aplicação da IA na previsão de deslizamentos, através de uma revisão sistemática com uma abordagem bibliométrica de artigos indexados na Scopus entre 2020 e 2024. Foi aplicado o protocolo PRISMA e utilizado o pacote bibliometrix no RStudio para processar um total de 118 documentos que cumpriam os critérios de qualidade e impacto. Os resultados revelam uma concentração temática em torno de técnicas como Random Forest, Support Vector Machine (SVM), redes neuronais artificiais e redes neuronais convolucionais, destacando também a crescente utilização de modelos híbridos. A produção científica desenvolveu-se sobretudo na Ásia e na Europa, com pouca representatividade na América Latina e em África. Embora tenham sido feitos avanços significativos na precisão preditiva e na modelação geoespacial, ainda existem desafios relacionados com a interpretação de modelos, a equidade geográfica na investigação e a integração eficaz destas ferramentas nas políticas de gestão de risco. Este estudo fornece uma visão consolidada do estado da arte e constitui uma referência útil para investigadores, decisores e planeadores territoriais empenhados na redução do risco de desastres através de tecnologias baseadas em inteligência artificial.

Palavras-chave: deslizamientos de terras; inteligência artificial; previsão; bibliometria; aprendizagem de máquina.

Introducción

Los deslizamientos de tierra constituyen uno de los fenómenos naturales más devastadores en términos de pérdida de vidas humanas, infraestructura y alteración de los ecosistemas. Su impacto es especialmente severo en regiones montañosas y de alta pendiente, donde la acción combinada de factores geológicos, hidrometeorológicos y antrópicos exacerba las condiciones de inestabilidad del terreno (Ali et al., 2021).

Tradicionalmente, la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos se ha basado en modelos físicos que requieren datos geotécnicos e hidrológicos detallados, lo que limita su aplicación en regiones extensas con escasa información (Lima et al., 2022). En cambio, los modelos empíricos, estadísticos y especialmente los enfoques de inteligencia artificial han cobrado relevancia por su capacidad de integrar múltiples variables, procesar grandes volúmenes de datos y generar predicciones precisas incluso en contextos complejos y con alta incertidumbre (Abbaszadeh Shahri & Maghsoudi Moud, 2021; Nsengiyumva & Valentino, 2020).

La irrupción de la inteligencia artificial en el campo de la predicción de deslizamientos ha transformado el enfoque metodológico de los estudios científicos recientes. Algoritmos como Random Forest, Support Vector Machines (SVM), redes neuronales artificiales (ANN) y arquitecturas más complejas como las redes convolucionales (CNN) y las redes recurrentes (RNN) han sido aplicados con resultados alentadores en distintos contextos geográficos, mejorando la precisión de los mapas de susceptibilidad y fortaleciendo los sistemas de alerta temprana (Huang et al., 2023). Estos modelos, al combinar datos derivados de sistemas de información geográfica (SIG), imágenes satelitales y registros históricos de eventos, han demostrado ser herramientas efectivas para apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo de desastres.

La literatura reciente evidencia un crecimiento notable en el uso de inteligencia artificial para modelar la susceptibilidad a deslizamientos, especialmente en países como China, Irán, India y Corea del Sur (Yang et al., 2022; Zhang et al., 2021). Se han desarrollado modelos híbridos que integran redes neuronales con algoritmos de optimización como el Grey Wolf Optimizer y algoritmos genéticos, logrando mejoras en precisión y rendimiento (Abbaszadeh Shahri & Maghsoudi Moud, 2021; Guo et al., 2024). Sin embargo, persisten desafíos asociados a la

interpretabilidad de los modelos, la estandarización de metodologías y la escasa transferibilidad de resultados a contextos con baja disponibilidad de datos, como América Latina y África subsahariana (Nsengiyumva & Valentino, 2020).

Además del aspecto técnico, la investigación sobre IA aplicada a deslizamientos debe contemplar la dimensión territorial y social del riesgo. En este sentido, estudios recientes han enfatizado la importancia de incorporar factores humanos y antrópicos —como el uso del suelo, la infraestructura vial y la expansión urbana— dentro de los modelos predictivos, reconociendo que el riesgo es una construcción compleja donde confluyen procesos físicos y sociales (Ali et al., 2021; Segoni et al., 2020). Asimismo, la integración de estas herramientas en planes de ordenamiento territorial y políticas públicas es aún limitada, lo que plantea un reto para la transferencia efectiva del conocimiento científico hacia la gestión operativa del riesgo.

Pese al auge de publicaciones científicas en los últimos años, no existen suficientes análisis sistemáticos que identifiquen las tendencias, vacíos y estructuras temáticas que han marcado el desarrollo de este campo. La diversidad de metodologías, la fragmentación temática y el carácter interdisciplinar de la inteligencia artificial aplicada a los deslizamientos dificultan la comprensión global del estado actual de la investigación. En este marco, los estudios bibliométricos constituyen una herramienta clave para evaluar el crecimiento, la concentración de autores e instituciones, la evolución de tópicos y las redes de colaboración que configuran el campo (Lima et al., 2022; Youssef & Pourghasemi, 2021).

Este artículo presenta una revisión bibliométrica sistemática sobre el uso de inteligencia artificial en la predicción de deslizamientos de tierra, basada en publicaciones de Scopus entre 2020 y 2024. Analiza los modelos de IA más empleados, autores, revistas, países líderes y palabras clave frecuentes. También examina la estructura temática mediante mapas de coocurrencia. El objetivo es identificar tendencias, desafíos y dinámicas investigativas actuales. La revisión ofrece una visión crítica y actualizada del estado del arte. Es un recurso útil para investigadores y responsables en gestión del riesgo geológico.

Metodología

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, específicamente como una revisión sistemática de literatura con análisis bibliométrico, centrado en las tendencias de investigación sobre el uso de inteligencia artificial para la predicción de deslizamientos de tierra. La revisión

bibliométrica, como técnica documental, permite examinar la producción científica a través del análisis de metadatos, facilitando la identificación de redes de colaboración, autores destacados, fuentes de publicación influyentes y áreas emergentes de investigación (Donthu et al., 2021).

Las fuentes de datos utilizadas en esta revisión fueron Scopus y el repositorio editorial MDPI. Aunque la búsqueda inicial abarcó el periodo 2015–2024, durante la fase de elegibilidad se restringió la selección a artículos publicados desde 2020. Esta decisión respondió a la necesidad de asegurar la actualidad y relevancia de los estudios, considerando el acelerado desarrollo de las técnicas de aprendizaje automático y *deep learning* en el ámbito de las geociencias.

La estrategia de búsqueda se diseñó utilizando operadores booleanos y términos clave asociados a la inteligencia artificial y a los procesos de inestabilidad de laderas. La búsqueda se ejecutó en el campo `TITLE-ABS-KEY` de Scopus, con la siguiente cadena: `((("landslide" OR "slope instability" OR "susceptibility") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "neural network" OR "random forest"))`

Los criterios de inclusión fueron definidos para asegurar la calidad y relevancia de los estudios incorporados. Se incluyeron únicamente artículos que: a) estuvieran publicados entre los años 2020 y 2024; b) contaran con un identificador DOI válido; c) tuvieran un mínimo de 20 citas acumuladas al momento de la recolección de datos; d) presentaran en el título (TI) o palabras clave (DE) alguno de los términos definidos en la estrategia de búsqueda.

Los documentos que no cumplieran con estos criterios, como aquellos sin citas o sin estructura bibliográfica completa, fueron excluidos. En cuanto a los registros obtenidos desde MDPI ($n = 4$), estos no pudieron ser procesados en el entorno de análisis debido a que el formato de exportación disponible carecía de campos estructurados necesarios para la función “convert2df()” del paquete *bibliometrix*. Por esta razón, y tras intentos de normalización de sus metadatos, se excluyó del análisis bibliométrico formal, aunque fueron considerados en las directrices PRISMA.

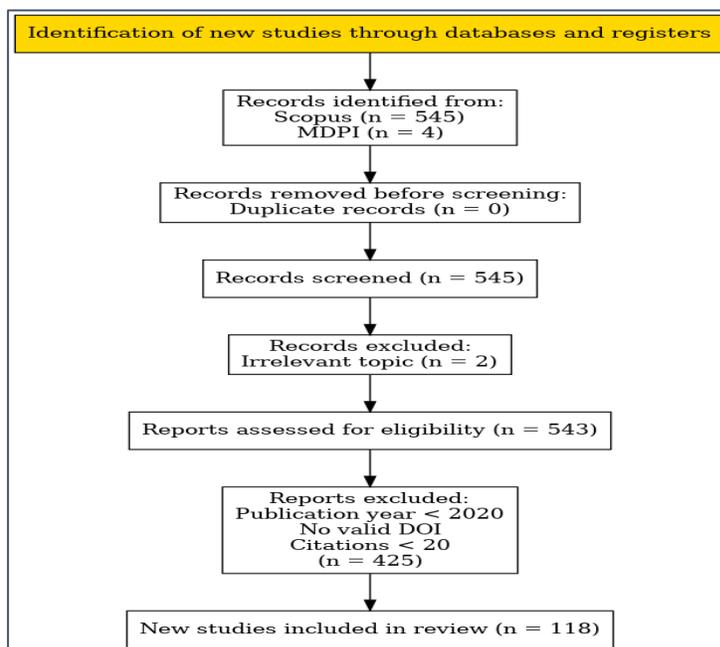
El procesamiento de los datos se realizó en RStudio (v2024.03) utilizando el paquete *bibliometrix* (Aria & Cuccurullo, 2017). Se convirtieron los registros .bib con `convert2df()`, se eliminaron duplicados con `distinct()`, y se aplicaron filtros temáticos y de elegibilidad (año ≥ 2020 , DOI válido, citas ≥ 20). Luego, se generaron indicadores con `biblioAnalysis()`, gráficos con `networkPlot()` y `thematicMap()`, y se construyó el diagrama PRISMA con *DiagrammeR*, siguiendo sus cuatro fases metodológicas

Aplicación del protocolo PRISMA

La revisión se estructuró siguiendo el protocolo PRISMA 2020 (Page et al., 2021), con el objetivo de mantener trazabilidad en la selección y exclusión de estudios. El proceso se resume en el Gráfico 1:

Gráfico N° 1

Diagrama de flujo PRISMA



Nota. Diagrama de flujo PRISMA 2020 que ilustra el proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de estudios para la revisión bibliométrica sobre el uso de inteligencia artificial en la predicción de deslizamientos de tierra.

Identificación: se recopilaron 549 artículos a partir de las búsquedas en Scopus (n = 545) y MDPI (n = 4).

Cribado: se eliminaron 0 duplicados, por lo que se mantuvieron 545 registros únicos para su análisis.

Selección temática: se descartaron 2 registros por no presentar concordancia temática con los términos establecidos en la estrategia de búsqueda.

Elegibilidad: se excluyeron 425 registros por no cumplir con los criterios mínimos establecidos: año de publicación anterior a 2020, ausencia de DOI válido o menos de 20 citas acumuladas.

Inclusión final: se incluyeron 118 artículos científicos, todos provenientes de Scopus, que cumplieron con todos los criterios de calidad, impacto y actualidad requeridos.

Este procedimiento garantizó que el análisis bibliométrico se base en literatura científica reciente, relevante y altamente citada, cumpliendo con el rigor metodológico del enfoque PRISMA y alineado con los objetivos de la investigación.

Resultados

Análisis bibliométrico de la producción científica

Se analizaron 118 artículos indexados en Scopus (2020–2024) que cumplieron con los criterios de inclusión. La muestra refleja el avance reciente en el uso de inteligencia artificial para predecir deslizamientos de tierra. Destacan enfoques computacionales, apoyo a decisiones y modelación geoespacial.

Como se muestra en la Tabla 1, el conjunto de datos abarca publicaciones procedentes de 34 fuentes, con un promedio de 72,29 citas por documento y una media de 15,70 citas anuales, lo que evidencia un impacto académico considerable. La edad promedio de los documentos es de 3,68 años, lo que confirma la vigencia del tema analizado. La tasa anual de crecimiento de publicaciones fue de -41,43 %, reflejando una disminución sostenida en el volumen de artículos.

La producción analizada estuvo compuesta casi en su totalidad por artículos científicos, con una amplia diversidad temática evidenciada en 671 Keywords Plus y 333 palabras clave de autor. Participaron 433 investigadores, con un promedio de 5.23 coautores por artículo y solo dos publicaciones de autoría individual. Además, más del 54 % de los trabajos fueron resultado de colaboraciones internacionales, lo que refleja una elevada interconexión académica a nivel global en torno al uso de inteligencia artificial para la gestión del riesgo por deslizamientos.

Tabla N° 1

Información general de los datos bibliométricos analizados (2020–2024)

Descripción	Valor
Periodo analizado	2020–2024
Total de documentos	118
Total de fuentes (revistas, libros, etc.)	34
Tasa anual de crecimiento de publicaciones (%)	-41,43
Edad promedio de los documentos (años)	3,68

Citas promedio por documento	72,29
Citas promedio por año por documento	15,70
Tipos de documentos	Artículos científicos
Palabras clave (Keywords Plus – ID)	671
Palabras clave de autor (DE)	333
Número total de autores	433
Número de apariciones de autores	617
Documentos de autoría única	2
Documentos por autor	0,273
Coautores por documento	5,23
Porcentaje de coautoría internacional (%)	54,24

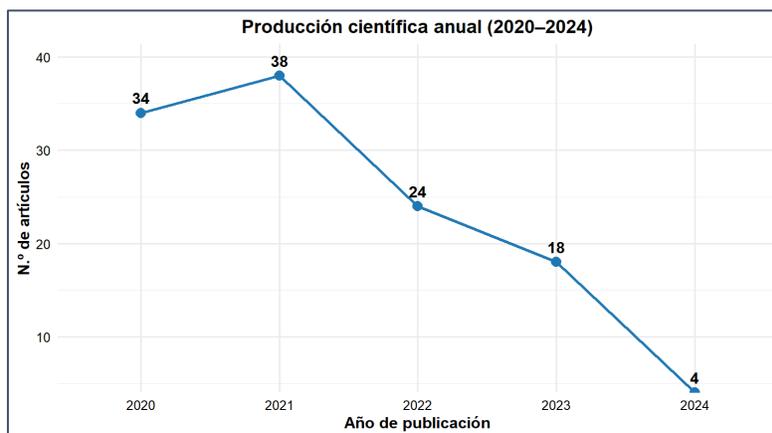
Nota. Elaboración propia con base en datos procesados mediante el paquete *bibliometrix* en RStudio.

Producción Científica anual

La evolución temporal de la producción científica muestra una tendencia decreciente en el periodo 2020–2024, con un pico en 2021 (38 artículos) y una caída marcada en 2024 (4 documentos), lo que representa una tasa anual de crecimiento negativa del $-41,43\%$ (Gráfica N° 2). Aunque esta disminución puede señalar una fase de estabilización, no implica necesariamente una pérdida de interés en la temática, que continúa siendo relevante desde el enfoque bibliométrico.

Gráfica N° 2

Producción científica anual



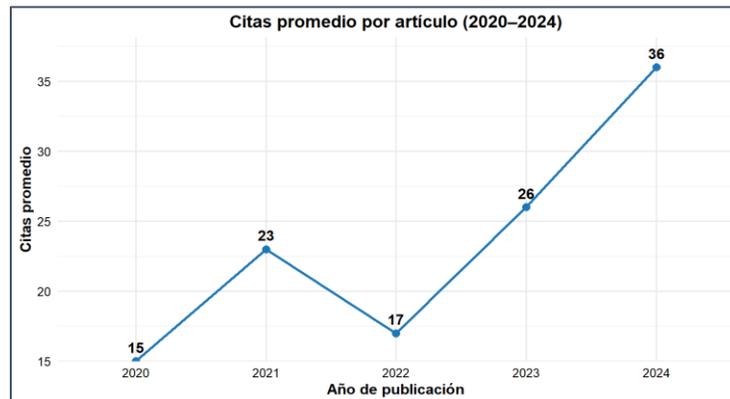
Nota. Elaboración propia con base en los datos bibliográficos procesados con el paquete *bibliometrix* en RStudio.

Citas promedio anuales

El análisis de citas promedio por artículo complementa la evaluación de la productividad al incorporar la dimensión de impacto académico. Como se ilustra en el Gráfico N° 3, se observa un comportamiento ascendente en la cantidad media de citas por documento a lo largo del periodo analizado. En 2020, los artículos registraron en promedio 15 citas, mientras que en 2024 esta cifra aumentó hasta 36 citas por artículo.

Gráfico N° 3

Citas promedio por artículo



Nota. Elaboración propia con base en los datos bibliográficos procesados con el paquete bibliometri en RStudio.

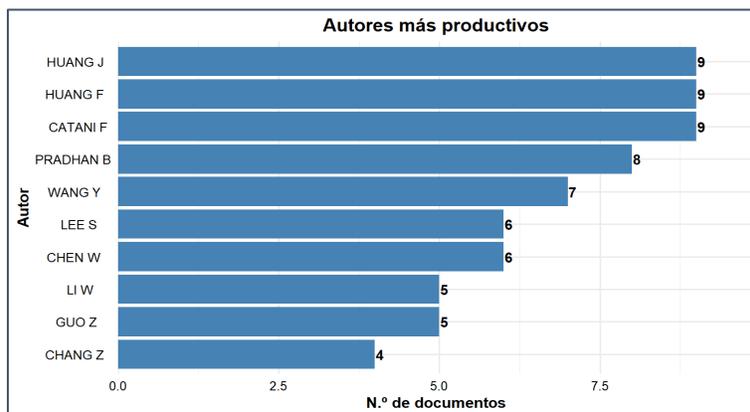
Autores más productivos

El análisis de productividad individual identificó a los autores más activos en el uso de inteligencia artificial para predecir deslizamientos. HUANG J, HUANG F y CATANI F lideran con 9 publicaciones cada uno, seguidos por PRADHAN B (8), WANG Y (7), LEE S y CHEN W (6), y finalmente LI W, GUO Z y CHANG Z con entre 4 y 5 artículos.

Estos resultados revelan una concentración significativa de la producción científica en un número reducido de autores, lo cual puede ser indicativo de núcleos de investigación especializados en el tema. Esta concentración también sugiere la existencia de líneas de investigación consolidadas, posiblemente respaldadas por grupos de trabajo colaborativo o por proyectos científicos continuos.

Gráfico N° 4

Autores más productivos en el estudio



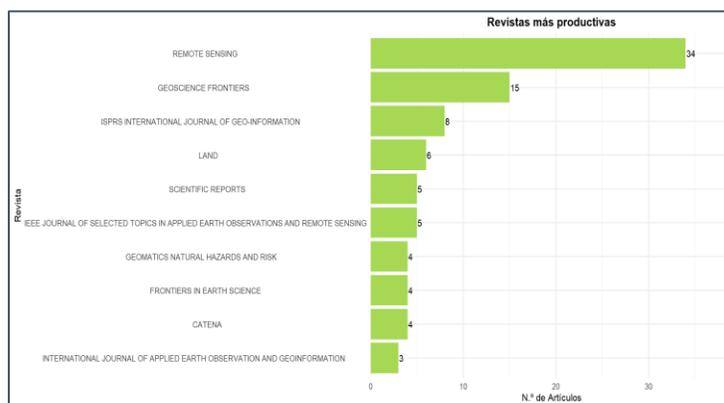
Nota. Elaboración propia con base en los datos bibliográficos procesados con el paquete *bibliometrix* en RStudio.

Revistas científicas con mayor número de publicaciones

El análisis de las fuentes de publicación revela que *Remote Sensing* lidera en número de artículos sobre inteligencia artificial aplicada a deslizamientos, con 34 publicaciones, seguida por *Geoscience Frontiers* (15) e *ISPRS International Journal of Geo-Information* (8) (Gráfica N° 5). La mayoría de los estudios se difunden en revistas de acceso abierto con enfoque en teledetección, geoinformación y análisis ambiental, lo que confirma el carácter interdisciplinar y aplicado de este campo de investigación.

Gráfico N° 5

Revistas científicas con mayor número de publicaciones



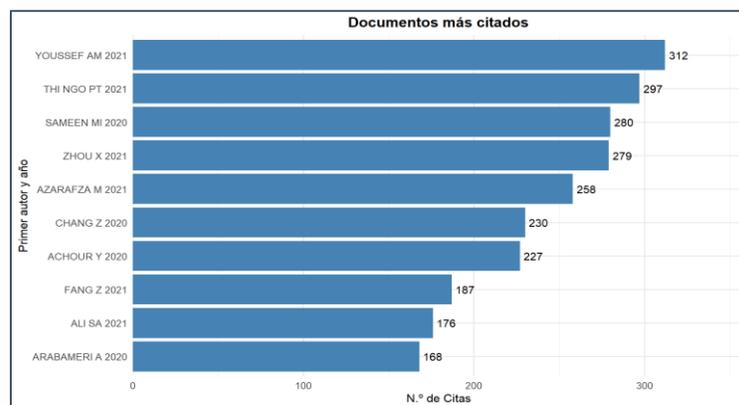
Nota. Elaboración propia con base en los datos bibliográficos procesados con el paquete *bibliometrix* en RStudio.

Documentos más citados

Los artículos más citados representan los aportes más influyentes en el campo, como muestra la Gráfica N° 6. Sobresalen los estudios de Youssef AM (2021) con 312 citas, Thi Ngo PT (2021) con 297 y Sameen MI (2020) con 280, los cuales emplean redes neuronales, random forests y modelos híbridos en la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos. Su elevado número de citas confirma su valor como referentes metodológicos esenciales para futuras investigaciones.

Gráfico N° 6

Documentos más citados



Nota. Elaboración propia con base en los datos bibliográficos procesados con el paquete *bibliometrix* en RStudio.

Países con mayor producción científica

Desde una perspectiva geográfica, el análisis bibliométrico muestra una fuerte concentración de la producción científica en países con alta capacidad investigativa. China lidera con más de 40 publicaciones, impulsada por su vulnerabilidad geodinámica y políticas científicas activas (Gráfica N° 7). Le siguen Australia, con un perfil eminentemente colaborativo (MCP), e India, Italia, Austria, Irán, Bangladesh, Corea del Sur y Alemania. La distinción entre publicaciones nacionales (SCP) e internacionales (MCP) refleja distintos niveles de internacionalización, evidenciando estrategias de cooperación clave en inteligencia artificial y predicción de riesgos naturales.

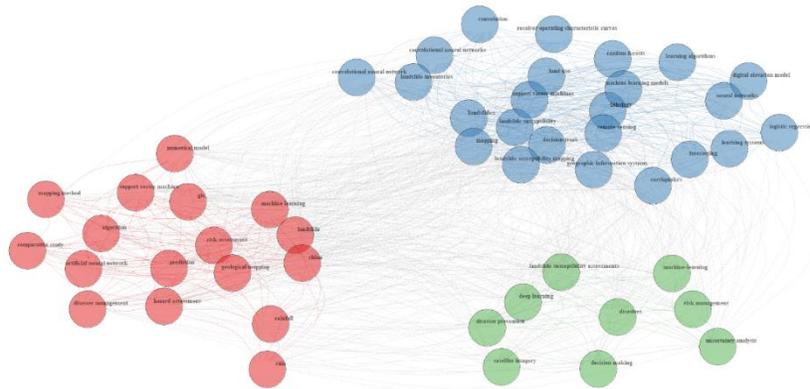
Red de coocurrencia

La estructura relacional entre palabras clave, visualizada mediante una red de coocurrencia, permite identificar los clústeres temáticos más consolidados. En la Gráfica N° 9 se observan múltiples nodos organizados por color según su agrupación semántica. Entre los núcleos destacados se encuentran aquellos centrados en *landslide susceptibility*, *machine learning*, *support vector machines*, *deep learning* y *GIS*.

La presencia de términos como *disaster management*, *risk assessment* y *remote sensing* refleja un enfoque aplicado orientado a la gestión de riesgos.

Gráfico N° 9

Red de coocurrencia de palabras clave



Nota. Elaboración propia con base en los datos bibliográficos procesados con el paquete bibliometrix en RStudio.

Mapa temático

El análisis temático permite evaluar la madurez y la centralidad de los tópicos investigativos mediante su distribución en cuatro cuadrantes. Como se aprecia en la Gráfica N° 10, los temas motores (alta densidad y centralidad) incluyen términos como *convolutional neural network*, *geographic information system* y *factor selection*, lo que evidencia su rol protagónico en la producción científica reciente.

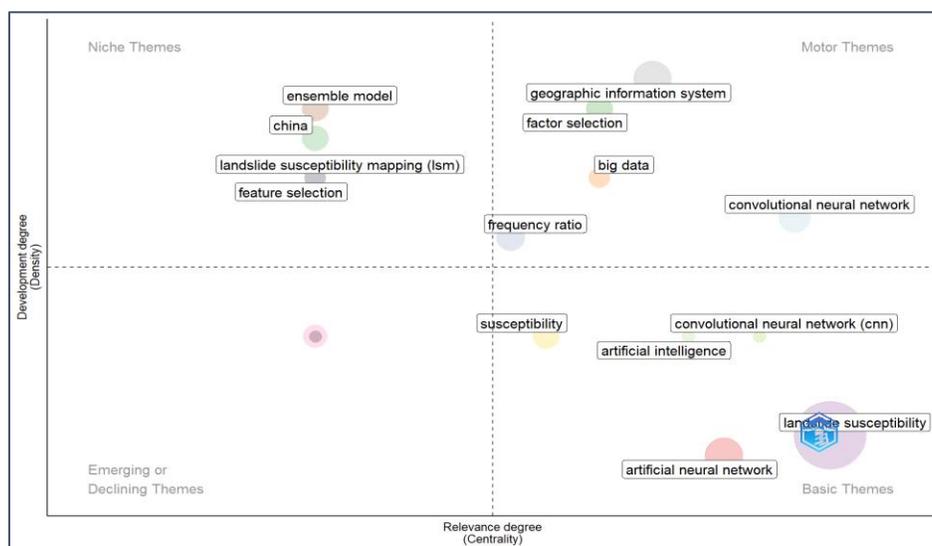
En el cuadrante de temas básicos, aparecen *artificial intelligence*, *landslide susceptibility*, *cnn* y *artificial neural network*, lo cual indica su función como fundamentos teóricos ampliamente referenciados, pero con potencial de mayor desarrollo metodológico.

Por otro lado, los temas especializados (alta densidad y baja centralidad) comprenden términos como *ensemble model*, *china* y *feature selection*, que representan enfoques profundos, pero menos

conectados con el resto del campo. Finalmente, el cuadrante de temas emergentes o en declive presenta escasa presencia, lo que podría interpretarse como una consolidación del campo y una direccionalidad investigativa establecida.

Gráfico N° 10

Mapa temático de la producción científica



Nota. Elaboración propia con base en los datos bibliográficos procesados con el paquete bibliometrix en RStudio.

Síntesis temática de los documentos más citados

Más allá del análisis cuantitativo, es fundamental examinar los artículos más citados, dado su alto impacto en el campo. Este apartado sintetiza los diez documentos más influyentes, destacando objetivos, metodologías, modelos utilizados y hallazgos clave. Así, se identifican las principales tendencias e innovaciones en el uso de inteligencia artificial para la predicción de deslizamientos de tierra.

El artículo de Youssef & Pourghasemi (2021), con 312 citas, es actualmente el más influyente en la literatura sobre predicción de deslizamientos mediante inteligencia artificial. Su estudio comparó siete algoritmos de aprendizaje automático en la cuenca de Abha (Arabia Saudita), destacando el modelo Random Forest por su alta capacidad predictiva ($AUC = 95.1\%$). La investigación integró variables topográficas, geológicas y de cobertura terrestre en un entorno SIG, aportando un marco

metodológico robusto y replicable para la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos en regiones áridas y montañosas.

Con 297 citas, el estudio de Thi Ngo et al. (2021) es una referencia clave en la aplicación de aprendizaje profundo para mapear la susceptibilidad a deslizamientos en Irán. Comparó redes RNN y CNN con 4069 eventos y 11 factores, logrando mayor precisión con RNN (AUC = 0.88). Identificó que un 20 % del territorio presenta alta o muy alta susceptibilidad, especialmente en zonas montañosas, evidenciando la utilidad de estos modelos en contextos geospaciales complejos y su valor para la gestión de riesgos a gran escala.

Con 280 citas, Sameen et al. (2020) propusieron un modelo basado en 1D-CNN optimizado con técnicas bayesianas para predecir la susceptibilidad a deslizamientos en Yangyang, Corea del Sur. Utilizando 17 factores seleccionados con Random Forest, lograron una precisión del 83.11 % y un AUC de 0.880, superando a modelos como ANN y SVM. La arquitectura incluyó regularización con dropout, evitando el sobreajuste pese al limitado tamaño muestral. El uso de optimización bayesiana mejoró el rendimiento en un 3 %. El estudio destaca la capacidad de las redes profundas para modelar relaciones no lineales en contextos geospaciales complejos.

Con 279 citas, Zhou et al. (2021) desarrollaron un modelo híbrido que combina Random Forest con GeoDetector y RFE para mejorar la predicción de deslizamientos en el condado de Wuxi, China. Usaron 22 factores condicionantes y 406 eventos históricos, obteniendo AUC de 0.863 y 0.860 en las versiones optimizadas, frente a 0.853 del modelo tradicional. Su aporte destaca por la selección eficaz de variables naturales y antrópicas clave, proponiendo una metodología robusta y replicable en áreas de alta susceptibilidad.

Con 258 citas, Azarafza et al. (2021) desarrollaron un modelo híbrido CNN–DNN para mapear la susceptibilidad a deslizamientos en Isfahan, Irán, usando 222 eventos históricos y 15 factores condicionantes. El modelo, validado con datos satelitales y de campo, alcanzó un AUC de 90.9 % y una precisión del 84 %, superando a métodos como SVM y regresión logística. Su principal aporte radica en la combinación de aprendizaje profundo con validación empírica rigurosa, logrando alta precisión en zonas geológicamente activas como el Zagros.

Con 230 citas, Chang et al. (2020) compararon modelos supervisados (SVM y CHAID) y no supervisados (K-means y Kohonen) para predecir la susceptibilidad a deslizamientos en Ningdu, China, usando datos satelitales y SIG. Con 12 factores geospaciales, SVM obtuvo el mejor desempeño (AUC = 0.892), superando ampliamente a los métodos no supervisados. El estudio

resalta la superioridad de los modelos supervisados y la importancia de contar con inventarios históricos para entrenar algoritmos más precisos en cartografía de riesgo.

Con 227 citas, el estudio de Achour & Pourghasemi (2020) evaluó el uso de algoritmos de aprendizaje automático (RF, SVM y BRT) para cartografiar la susceptibilidad a deslizamientos en la autopista A1 en Argelia. Utilizando nueve factores geoambientales, el modelo Random Forest obtuvo el mejor desempeño (AUC = 0.972), destacando por su precisión y estabilidad. El trabajo evidencia la eficacia de los SIG y técnicas avanzadas de datos en la identificación de zonas críticas, aportando herramientas clave para la planificación territorial y la gestión del riesgo en infraestructuras viales vulnerables.

Con 187 citas, Fang et al. (2021) evaluaron técnicas de ensamblaje heterogéneo para predecir la susceptibilidad a deslizamientos en Yanshan, China. Compararon cuatro enfoques (stacking, blending, promedios simple y ponderado) integrando modelos como CNN, RNN, SVM y regresión logística, con 16 factores y 380 eventos históricos. El método blending destacó con un AUC de 0.858 y una precisión del 80.70 %. El estudio demuestra que los modelos ensamblados superan a los individuales, proponiendo un enfoque robusto y adaptable a otros contextos de riesgo geográfico.

Con 176 citas, el estudio de Ali et al. (2021) comparó métodos de decisión multicriterio difusos (FDEMATEL-ANP) con algoritmos de aprendizaje automático (Naïve Bayes y Random Forest) para modelar la susceptibilidad a deslizamientos en Eslovaquia. Utilizando 2000 puntos georreferenciados y 16 factores condicionantes, Random Forest destacó con una AUC de 0.954 y una precisión del 92.2 %. El enfoque integró técnicas SIG y validación rigurosa, consolidándose como una metodología replicable para la planificación territorial en zonas de riesgo.

Con 168 citas, Arabameri et al. (2020) evaluaron la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río Gallicash, Irán, mediante los modelos RF, ADTree y FLDA. Con 249 eventos y 16 factores condicionantes, Random Forest mostró el mejor desempeño (AUC = 0.97), seguido por FLDA y ADTree. El 16.1 % del área fue clasificada como de alta susceptibilidad. El estudio resalta el valor de estos modelos en la gestión del riesgo y la planificación territorial, promoviendo el uso de mapas predictivos para prevenir desarrollos en zonas vulnerables.

Como complemento a la revisión narrativa, la Tabla N° 2 presenta una síntesis estructurada de los diez artículos más citados, detallando los autores, año de publicación, país donde se aplicó el estudio, modelos utilizados y número total de citas. Esta representación tabular permite una

visualización comparativa clara de los enfoques metodológicos más influyentes en el uso de inteligencia artificial para la predicción de deslizamientos, y sirve como referencia rápida para identificar las tendencias dominantes en el campo.

Tabla N° 2

Resumen de los diez artículos más citados sobre inteligencia artificial aplicada a la predicción de deslizamientos de tierra

N.º	Autor(es)	Año	País de estudio	Modelos utilizados	Citas
1	Youssef & Pourghasemi	2021	Arabia Saudita	Random Forest, SVM, Naïve Bayes, MLP, Logistic Regression, etc.	312
2	Thi Ngo et al.	2021	Irán	RNN, CNN	297
3	Sameen, Pradhan & Lee	2020	Corea del Sur	1D-CNN, ANN, SVM, Optimización Bayesiana, Random Forest	280
4	Zhou et al.	2021	China (Wuxi)	Random Forest, GeoDetector, Recursive Feature Elimination (RFE)	279
5	Azarafza et al.	2021	Irán (Isfahan)	CNN–DNN, SVM, Regresión logística, Árboles de decisión, MLP	258
6	Chang et al.	2020	China (Ningdu)	SVM, CHAID, K-means, Kohonen	230

7	Achour & Pourghasemi	2020	Argelia	Random Forest, SVM, Boosted Regression Tree (BRT)	227
8	Fang et al.	2021	China (Yanshan)	CNN, RNN, SVM, Logistic Regression, Ensemble (stacking, blending, etc.)	187
9	Ali et al.	2021	Eslovaquia	FDEMATEL-ANP, Naïve Bayes, Random Forest	176
10	Arabameri et al.	2020	Irán (Gallicash)	Random Forest, ADTree, FLDA	168

Nota. Elaboración propia con base en los artículos analizados en la sección 3.2.

Discusión

Los resultados de la presente revisión bibliométrica evidencian una evolución significativa en la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (IA) para la predicción de deslizamientos de tierra en la última década. La alta concentración de publicaciones en revistas especializadas y la colaboración internacional destacada reflejan un interés creciente y una consolidación del campo. Sin embargo, al contrastar estos hallazgos con estudios recientes, emergen diversas consideraciones que enriquecen la comprensión del panorama actual y futuro de esta línea de investigación.

Los modelos Random Forest, SVM y redes neuronales destacan en los estudios recientes por su eficacia en capturar relaciones no lineales entre variables geológicas y ambientales. Kudaibergenov et al. (2024) subrayan su amplia adopción en la evaluación de susceptibilidad a deslizamientos. Además, el uso de redes neuronales convolucionales junto con datos de sensores remotos ha mejorado significativamente la precisión en la detección y mapeo de zonas propensas a deslizamientos.

No obstante, estudios como el de Chen & Fan (2023) subrayan la importancia de una selección adecuada de factores condicionantes para mejorar la precisión de los modelos predictivos. La

aplicación de métodos como la eliminación recursiva de características (RFE) y la optimización por enjambre de partículas (PSO) ha permitido identificar las variables más relevantes, optimizando así el rendimiento de los modelos de IA en la predicción de deslizamientos.

Una de las críticas recurrentes a los modelos de aprendizaje profundo es su limitada interpretabilidad. En respuesta, Zhengjing & Gang (2023) proponen la integración de conocimientos previos en modelos de aprendizaje profundo, utilizando arquitecturas basadas en transformadores para mejorar la transparencia y comprensión de las predicciones realizadas. Este enfoque no solo mejora la precisión, sino que también facilita la adopción de estas herramientas por parte de los tomadores de decisiones y profesionales en gestión de riesgos.

La incorporación de técnicas híbridas de inteligencia artificial ha potenciado el rendimiento de los modelos de susceptibilidad a deslizamientos. Guo et al. (2024) combinaron CNN con unidades GRU logrando alta precisión en zonas montañosas, mientras que Abbaszadeh Shahri & Maghsoudi Moud (2021) integraron el algoritmo Grey Wolf con redes neuronales artificiales, obteniendo excelentes resultados en terrenos complejos. Estos avances reflejan una evolución hacia enfoques más integrales y adaptativos frente a la complejidad geoespacial.

A pesar del crecimiento sostenido en la producción científica sobre el uso de inteligencia artificial para predecir deslizamientos de tierra, persisten desafíos importantes relacionados con la representatividad geográfica de estos estudios. La mayoría de las investigaciones se concentran predominantemente en regiones específicas como Asia y Europa, dejando importantes brechas en áreas subrepresentadas como América Latina y África. Este sesgo geográfico limita significativamente la generalización y aplicabilidad de los modelos desarrollados, lo que destaca la urgente necesidad de ampliar investigaciones hacia contextos geográficos diversos (Akosah et al., 2024).

Lima et al. (2022) evidencian que la precisión de los modelos de susceptibilidad a deslizamientos basados en datos depende críticamente de la calidad y disponibilidad de información geoespacial. La escasez y heterogeneidad de datos en ciertas regiones limita su aplicabilidad en otros contextos, lo que resalta la necesidad de fortalecer la recolección y normalización de datos a nivel global. Esto es clave para mejorar la representatividad y utilidad de los modelos en escenarios afectados por el cambio climático.

La aplicación de modelos de inteligencia artificial en sistemas de alerta temprana y planificación territorial representa un área estratégica y de creciente interés. Estudios recientes han evidenciado

su potencial para mejorar la capacidad de respuesta ante eventos de deslizamientos, permitiendo una detección más precisa y oportuna de áreas en riesgo (Pugliese Vilorio et al., 2024). Por ejemplo, Huang et al. (2023) demostraron que al integrar múltiples tipos de deslizamientos —como caídas de rocas y movimientos coluviales— en modelos acoplados como C5.0 y SVM, se logra reducir la incertidumbre predictiva y mejorar la precisión en regiones montañosas.

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías requiere una colaboración estrecha entre científicos, autoridades locales y comunidades, asegurando que las soluciones desarrolladas sean accesibles, comprensibles y adaptadas a las necesidades específicas de cada contexto.

Conclusiones

- Esta revisión bibliométrica caracterizó la investigación global sobre el uso de inteligencia artificial para predecir deslizamientos entre 2020 y 2024. El campo muestra una consolidación metodológica, con predominio de publicaciones en revistas de acceso abierto y fuerte participación de autores asiáticos, especialmente de China. Se destacan algoritmos como Random Forest, SVM, redes neuronales profundas y modelos híbridos, que han mostrado alta capacidad predictiva en entornos geoespaciales complejos.
- Desde el punto de vista técnico, el campo ha evolucionado hacia metodologías cada vez más precisas, como el aprendizaje profundo, la optimización de características y la combinación de modelos, lo cual ha favorecido el desarrollo de mapas de susceptibilidad más confiables. También se han registrado avances en la interpretabilidad de los modelos, mediante la incorporación de arquitecturas más transparentes, capaces de facilitar la toma de decisiones en entornos reales.
- Persisten desafíos clave en este campo, como la baja representatividad geográfica de los estudios, con limitada cobertura en América Latina y África, lo que dificulta la generalización de los modelos. La escasa calidad y disponibilidad de datos geoespaciales en regiones con menor infraestructura técnica también limita su aplicabilidad. Además, integrar la inteligencia artificial en sistemas de alerta temprana requiere una articulación efectiva entre investigadores, autoridades y comunidades para garantizar soluciones contextualizadas y accesibles.

Finalmente, la inteligencia artificial ha probado ser una herramienta eficaz en la predicción de deslizamientos, mejorando la precisión y adaptabilidad de los modelos. No obstante, su aplicación

global exige una agenda investigativa más inclusiva y orientada a resolver problemas reales en comunidades vulnerables. Es clave estandarizar bases de datos, fortalecer la cooperación internacional y desarrollar modelos más explicables para avanzar hacia una gestión del riesgo equitativa y basada en evidencia científica.

Referencias Bibliográficas

1. Abbaszadeh Shahri, A., & Maghsoudi Moud, F. (2021). Landslide susceptibility mapping using hybridized block modular intelligence model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(1), 267–284. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01922-8>
2. Achour, Y., & Pourghasemi, H. R. (2020). How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps? *Geoscience Frontiers*, 11(3), 871–883. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>
3. Akosah, S., Gratchev, I., Kim, D.-H., & Ohn, S.-Y. (2024). Application of Artificial Intelligence and Remote Sensing for Landslide Detection and Prediction: Systematic Review. *Remote Sensing*, 16(16), 2947. <https://doi.org/10.3390/rs16162947>
4. Ali, S. A., Parvin, F., Vojteková, J., Costache, R., Linh, N. T. T., Pham, Q. B., Vojtek, M., Gigović, L., Ahmad, A., & Ghorbani, M. A. (2021). GIS-based landslide susceptibility modeling: A comparison between fuzzy multi-criteria and machine learning algorithms. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 857–876. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.004>
5. Arabameri, A., Saha, S., Roy, J., Chen, W., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2020). Landslide Susceptibility Evaluation and Management Using Different Machine Learning Methods in The Gallicash River Watershed, Iran. *Remote Sensing*, 12(3), 475. <https://doi.org/10.3390/rs12030475>
6. 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>
7. Azarafza, M., Azarafza, M., Akgün, H., Atkinson, P. M., & Derakhshani, R. (2021). Deep learning-based landslide susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 11(1), 24112. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03585-1>
8. Chang, Z., Du, Z., Zhang, F., Huang, F., Chen, J., Li, W., & Guo, Z. (2020). Landslide Susceptibility Prediction Based on Remote Sensing Images and GIS: Comparisons of

- Supervised and Unsupervised Machine Learning Models. *Remote Sensing*, 12(3), 502. <https://doi.org/10.3390/rs12030502>
9. Chen, C., & Fan, L. (2023). Selection of contributing factors for predicting landslide susceptibility using machine learning and deep learning models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02556-4>
 10. 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>
 11. Fang, Z., Wang, Y., Peng, L., & Hong, H. (2021). A comparative study of heterogeneous ensemble-learning techniques for landslide susceptibility mapping. *International Journal of Geographical Information Science*, 35(2), 321–347. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1808897>
 12. Guo, Z., Tian, B., Zhu, Y., He, J., & Zhang, T. (2024). How do the landslide and non-landslide sampling strategies impact landslide susceptibility assessment? — A catchment-scale case study from China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(3), 877–894. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.07.026>
 13. Huang, F., Xiong, H., Yao, C., Catani, F., Zhou, C., & Huang, J. (2023). Uncertainties of landslide susceptibility prediction considering different landslide types. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(11), 2954–2972. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.03.001>
 14. Kudaibergenov, M., Nurakynov, S., Iskakov, B., Iskaliyeva, G., Maksim, Y., Orynassarova, E., Akhmetov, B., & Sydyk, N. (2024). Application of Artificial Intelligence in Landslide Susceptibility Assessment: Review of Recent Progress. *Remote Sensing*, 17(1), 34. <https://doi.org/10.3390/rs17010034>
 15. Lima, P., Steger, S., Glade, T., & Murillo-García, F. G. (2022). Literature review and bibliometric analysis on data-driven assessment of landslide susceptibility. *Journal of Mountain Science*, 19(6), 1670–1698. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7254-9>

16. Nsengiyumva, J. B., & Valentino, R. (2020). Predicting landslide susceptibility and risks using GIS-based machine learning simulations, case of upper Nyabarongo catchment. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 1250–1277. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1785555>
17. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
18. Pugliese Vilorio, A. de J., Folini, A., Carrion, D., & Brovelli, M. A. (2024). Hazard Susceptibility Mapping with Machine and Deep Learning: A Literature Review. *Remote Sensing*, 16(18), 3374. <https://doi.org/10.3390/rs16183374>
19. Sameen, M. I., Pradhan, B., & Lee, S. (2020). Application of convolutional neural networks featuring Bayesian optimization for landslide susceptibility assessment. *CATENA*, 186, 104249. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104249>
20. Segoni, S., Pappafico, G., Luti, T., & Catani, F. (2020). Landslide susceptibility assessment in complex geological settings: sensitivity to geological information and insights on its parameterization. *Landslides*, 17(10), 2443–2453. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01340-2>
21. Thi Ngo, P. T., Panahi, M., Khosravi, K., Ghorbanzadeh, O., Kariminejad, N., Cerda, A., & Lee, S. (2021). Evaluation of deep learning algorithms for national scale landslide susceptibility mapping of Iran. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 505–519. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.06.013>
22. Yang, Z., Xu, C., & Li, L. (2022). Landslide Detection Based on ResU-Net with Transformer and CBAM Embedded: Two Examples with Geologically Different Environments. *Remote Sensing*, 14(12), 2885. <https://doi.org/10.3390/rs14122885>

23. Youssef, A. M., & Pourghasemi, H. R. (2021). Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 639–655. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.05.010>
24. Zhang, X., Zhu, C., He, M., Dong, M., Zhang, G., & Zhang, F. (2021). Failure Mechanism and Long Short-Term Memory Neural Network Model for Landslide Risk Prediction. *Remote Sensing*, 14(1), 166. <https://doi.org/10.3390/rs14010166>
25. Zhengjing, M., & Gang, M. (2023). Knowledge-infused Deep Learning Enables Interpretable Landslide Forecasting. *ArXiv*, 2307.08951.
26. Zhou, X., Wen, H., Zhang, Y., Xu, J., & Zhang, W. (2021). Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. *Geoscience Frontiers*, 12(5), 101211. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101211>

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).