



Análisis de susceptibilidad geológica con menor sesgo: comparación de metodologías de análisis para la gestión del riesgo geológico

Geological susceptibility analysis with lower bias: comparison of research methodologies for geological risk management

ALEJANDRO ÁLVAREZ URIBE

Proyecto de grado para optar por el título de geólogo

Evaluador:

Ph.D. José Fernando Duque Trujillo

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2024

CONTENIDO

Resumen	V
Abstract	VI
1. Introducción	1
2. ¿Qué es la gestión del riesgo geológico?	2
2.1. Erupciones volcánicas	2
2.2. Inundaciones	2
2.3. Movimientos en masa	3
3. Análisis de susceptibilidad y amenaza	3
3.1. Método Heurístico	4
3.1.1. Análisis geomorfológico	4
3.1.2. Combinación de mapas factores	5
3.1.3. Método análisis jerárquico de procesos (AHP)	5
3.2. Métodos Estadísticos	6
3.2.1. Análisis estadístico bivariado (Peso de la evidencia)	6
3.2.1. Análisis estadístico univariado	7
3.2.2. Análisis estadístico multivariado (Modelo de regresión lógica)	7
3.3. Método Determinístico	8
3.3.1. Talud infinito	8
3.4. Método basado en el entrenamiento y la simulación (IA)	9
3.4.1. Redes neuronales (ANN)	9
4. Comparación de casos de estudio	10
4.1. Caso de estudio 1: heurístico, estadístico multivariado y red neuronal (Francipane, 2014)	10
4.2. Caso de estudio 2: Estadístico multivariado y red neuronal (Pourghasemi, 2020)	12

4.1.	Caso de estudio 3: estadístico bivariado y estadístico multivariado (Aristizábal, 2019)	13
4.2.	Caso de estudio 4: heurístico y estadístico univariado (González, 2015)	14
4.3.	Caso de estudio 5: heurístico y estadístico bivariado (Ramírez, 2017)	16
5.	Discusión	17
6.	Conclusiones	21
7.	Bibliografía	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la red neuronal. Modificado de (Norsakinah, 2022).....	10
Figura 2. Mapas de susceptibilidad mediante metodologías a) heurístico, b) estadístico multivariado, c) redes neuronales, d) curva AUC. Tomado de (Francipane et al., 2014)....	11
Figura 3. Mapas de susceptibilidad mediante metodologías, a) estadístico multivariado, b) redes neuronales, c) curva AUC. Tomado de (Pourghasemi et al., 2020).....	12
Figura 4 Mapas de susceptibilidad a) método estadístico bivariado b) método estadístico univariado. Aristizábal (2019).....	13
Figura 5. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos, a) método heurístico, b) método estadístico. Gonzáles (2015).....	14
Figura 6. a) mapa de susceptibilidad por deslizamientos, método heurístico. b) mapa de susceptibilidad por deslizamientos, método estadístico bivariado. Ramírez (2017).....	16
Figura 7. Comparación de Precisión (AUC) por metodología y estudio. Elaboración propia.	19

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escala de comparación AHP. Modificada de Saaty et al., (1980).....	5
Tabla 2. Áreas y porcentajes método heurístico. Modificado de Gonzáles (2015).....	15
Tabla 3. Áreas y porcentajes método estadístico. Modificado de Gonzáles (2015).....	15
Tabla 4. Tabla resumen metodologías para evaluación de susceptibilidad y amenaza. Elaboración propia.....	20

Resumen.

En la actualidad, muchos análisis para entender los distintos fenómenos asociados a la gestión del riesgo en la geología se basan a partir de análisis heurísticos. El grado y la calidad de estos análisis dependen significativamente del conocimiento y la experiencia que el experto tenga sobre los procesos geomorfológicos presentes en las zonas de estudio. Debido a la ambigüedad de este método, es susceptible a interpretaciones subjetivas. El presente trabajo, analiza las demás metodologías usadas para el análisis de susceptibilidad. Entre las alternativas se incluyen metodologías heurísticas, estadísticas, determinísticas, y métodos basados en el entrenamiento y la simulación (IA), identificando cuál de estas metodologías proporciona una base más sólida para la toma de decisiones en la gestión del riesgo geológico, abordando las problemáticas asociadas con la implementación de estos métodos y su impacto en la efectividad de los análisis.

Palabras clave: Susceptibilidad geológica – Gestión del riesgo – Heurística - Sesgo.

Abstract

Currently, many analyses aiming at understanding the various phenomena associated with risk management in geology are based on heuristic approaches. The degree and quality of these analyses depend significantly on the expert's knowledge and experience about the geomorphological processes present in the study areas. Due to the ambiguity of this method, it is susceptible to subjective interpretations. This paper analyzes other methodologies used for susceptibility analysis. Among the alternatives are heuristic, statistical, deterministic methodologies, and methods based on training and simulation (AI), identifying which of these provides a more solid foundation for decision-making in geological risk management, while addressing the challenges associated with implementing these methods and their impact on the effectiveness of the analyses.

Keywords: Geological susceptibility – Risk management – Heuristics – Bias.

1. Introducción

La gestión de riesgos geológicos es un campo que se enfoca en identificar, evaluar y mitigar los peligros naturales que pueden afectar tanto a las comunidades humanas como al medio ambiente (Baas, 2008). Este proceso implica la recolección de datos geológicos, el análisis de susceptibilidad y la implementación de estrategias de mitigación usando diferentes metodologías de análisis (Van Westen et al., 2008).

Actualmente, la metodología más común para el análisis de estas amenazas es la heurística, la cual se basa en el juicio experto y en la interpretación de datos geológicos y geomorfológicos para identificar áreas susceptibles a deslizamientos de tierra y otros fenómenos similares (Varnes et al., 1978). Aunque es una metodología eficaz debido a su rapidez y simplicidad, puede estar sujeta a sesgos personales, ya que depende en gran medida de la experiencia y el conocimiento del profesional que evalúa la zona (Carrara et al., 1995). Según Guzzetti et al. (2005), la reducción del sesgo es crucial para mejorar la objetividad y la validez de los resultados, especialmente en contextos donde las decisiones pueden tener un impacto significativo en los resultados.

Además de los enfoques heurísticos, existen varias metodologías para el análisis de riesgo, entre ellas los enfoques estadísticos, determinísticos y metodologías basadas en el entrenamiento y la simulación (IA) (SGC, 2013). Los métodos estadísticos utilizan datos históricos y modelos matemáticos para predecir la probabilidad de deslizamientos basados en variables observadas (Lee et al., 2007). Los enfoques determinísticos, por otro lado, se basan en principios de la mecánica de suelos y rocas para evaluar la estabilidad de las pendientes bajo condiciones específicas (Cornell et al., 1968). Los métodos basados en el entrenamiento y la simulación (IA) simulan el comportamiento de los movimientos en masa en distintas situaciones o escenarios, permitiendo realizar un análisis rápido usando un alto flujo de información (Russell et al., 2020).

Este trabajo pretende analizar y comparar diferentes metodologías de análisis para la obtención de resultados en la solución de problemas para la gestión de riesgos y desastres enfocado en los movimientos en masa, exponiendo las ventajas, desventajas y enfocándose en qué otras problemáticas implican el uso en las metodologías propuestas.

2. ¿Qué es la gestión del riesgo geológico?

La gestión del riesgo geológico es el proceso mediante el cual se identifican, evalúan, mitigan y monitorean los peligros que pueden afectar tanto a las personas como a los bienes, infraestructuras y el medio ambiente (*Alcántara et al., 2002*). La gestión del riesgo geológico no solo implica la comprensión científica de estos fenómenos, sino también la implementación de medidas técnicas y administrativas para reducir su impacto y prevenir daños a la sociedad. El objetivo principal de este proceso es minimizar las pérdidas humanas y materiales mediante una planificación adecuada, la construcción de infraestructuras resistentes y la preparación de la población para reaccionar de manera efectiva ante eventos catastróficos (*UNISDR, 2009*).

Los eventos naturales predecibles más comunes que generan situaciones de riesgo para la población en Colombia son las erupciones volcánicas, los deslizamientos de tierra y las inundaciones (*UNGRD, 2014*).

2.1. Erupciones volcánicas

Una erupción volcánica es un proceso en el que se liberan materiales provenientes del interior de la Tierra a través de fracturas en la corteza terrestre (volcanes) (*Siebert et al., 2010*). Estos materiales pueden incluir lava, gases volcánicos, cenizas y fragmentos de roca, que son expulsados debido a la presión de los gases acumulados en el magma (*Cashman et al., 2013*). Las erupciones volcánicas pueden variar en intensidad y tipo, desde explosiones violentas, como las erupciones plinianas, hasta flujos de lava.

Las erupciones volcánicas son predecibles gracias a el monitoreo mediante diferentes técnicas, como el monitoreo sísmico, de gases, y de temperatura (*Cashman et al., 2013*).

2.2. Inundaciones

Estos eventos ocurren cuando grandes cantidades de agua caen en un corto período de tiempo. Son comunes en ríos ubicados en áreas montañosas con pendientes pronunciadas, y a menudo se originan a partir de lluvias intensas sobre terrenos frágiles o desprovistos de vegetación, además de la actividad humana, la cual deteriora progresivamente las cuencas y cauces de ríos y quebradas, taponando los drenajes naturales (*UNGRD, 2014*).

La zonificación de la susceptibilidad a inundaciones se realiza a través de análisis geomorfológicos, donde se hace una recopilación de datos de inundaciones y una interpretación de geoformas y relieves del ambiente fluvial para así llegar a una evaluación usando estos tres criterios (*Corcuencas, 2014*).

2.3. Movimientos en masa

Los movimientos en masa son desplazamientos del terreno en dirección de la pendiente, impulsados principalmente por la gravedad y potenciados por diversos factores como la presencia de agua, eventos sísmicos, cargas excesivas, excavaciones para construcción de viviendas o la apertura de caminos y vías (*DAGRD, 2014*). Estos desplazamientos generan alteraciones visibles en el terreno, como grietas, hundimientos e incluso desprendimientos de grandes volúmenes de suelo o roca. Debido a su magnitud, pueden causar daños o destrucción de infraestructuras, viviendas, cultivos y provocar el represamiento de ríos o quebradas (*DAGRD, 2014*).

Existen diversas metodologías para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, que incluyen enfoques heurísticos, estadísticos, determinísticos, y aquellos basados en el entrenamiento y la simulación (IA) (*SGC, 2013*).

3. Análisis de susceptibilidad y amenaza.

Un análisis de susceptibilidad y amenaza evalúa la probabilidad de que ciertos procesos geológicos, como movimientos en masa, inundaciones o erupciones volcánicas, ocurran en un área específica y el posible impacto de dichos eventos en términos de daños a las personas, infraestructura y medio ambiente (*Guzzetti et al., 2005*).

El término susceptibilidad se refiere a la propensión de un área a experimentar eventos naturales debido a sus características intrínsecas, como la topografía, la composición del suelo o la proximidad a fallas tectónicas y cuerpos de agua. Por ejemplo, en terrenos inclinados y con alta saturación de agua, es más probable que ocurran deslizamientos, mientras que, en zonas bajas y próximas a ríos, la susceptibilidad se relaciona con el riesgo de inundaciones (*Pourghasemi et al., 2020; Li et al., 2021*). En áreas volcánicas, la susceptibilidad considera la posibilidad de actividad eruptiva y sus impactos asociados, como flujos de lava y caída de ceniza (*Alcántara-Ayala, 2002*).

Amenaza es la probabilidad de ocurrencia de un evento natural específico que pueda impactar a las comunidades. Este concepto combina tanto la probabilidad de que ocurra el evento como su magnitud y daño que pueda causar, proporcionando una evaluación completa del riesgo (*Guzzetti et al., 2005*).

Existen diversos enfoques para llevar a cabo estos análisis, los cuales varían según el tipo de datos disponibles, la escala del estudio y los objetivos específicos de la evaluación. Cada tipo de análisis presenta ventajas y limitaciones.

A continuación, se describirán los distintos tipos de análisis de susceptibilidad y amenaza geológica para los movimientos en masa.

3.1. Método Heurístico

La metodología heurística depende de la clasificación y ponderación de los factores que influyen en la inestabilidad del terreno, de acuerdo con el impacto anticipado que estos factores tienen en la ocurrencia de movimientos en masa (*Brabb et al., 1984; Anbalagan et al., 1992*). Estos enfoques, caracterizados por ser indirectos, permiten extrapolar los resultados a zonas que no han presentado movimientos en masa, pero que comparten factores y características similares. Si bien este método permite incluir múltiples variables en el análisis y realizar una zonificación de manera rápida, su efectividad está fuertemente condicionada por la habilidad y experiencia del experto en cuanto a los movimientos en masa en la región de estudio y los factores que los provocan, lo que introduce un alto nivel de subjetividad y sesgo. (*Guzzetti et al., 2005*). Es posible llevar a cabo tres tipos de análisis heurísticos a través del análisis geomorfológico, la combinación de mapas factores y el método análisis jerárquico de procesos (AHP).

3.1.1. Análisis geomorfológico

Es principal tipo de análisis heurístico, introducido por *Kienholz, et al., (1977)*, el cual se centra en el estudio de las formas del terreno. Este método es especialmente útil para estudios a escala regional, ya que se basa en la evaluación directa en campo, fundamentada en la experiencia personal y a que se evalúa directamente la zona, pero, debido a la variabilidad de las condiciones geográficas, las reglas de la decisión son difíciles de estandarizar ya que estas cambian según la ubicación (*Carrara et al., 1995*). No obstante, al

incorporar un cierto grado de subjetividad, este método complica la comparación entre estudios realizados por diferentes investigadores.

3.1.2. Combinación de mapas factores

Según *Stevenson et al., (1977)*, la combinación de mapas factores es una técnica utilizada en el análisis espacial y geomorfológico que implica superponer varios mapas temáticos, cada uno representando diferentes factores o variables que influyen en un fenómeno geográfico específico, como los movimientos en masa. Estos mapas se combinan de manera cualitativa o cuantitativa para identificar áreas de riesgo o patrones espaciales en función de la interacción entre los factores. El resultado es un mapa integrado que ayuda a visualizar cómo los distintos factores contribuyen al fenómeno en cuestión.

3.1.3. Análisis jerárquico de procesos (AHP)

Este enfoque emplea un método de toma de decisiones multicriterio, el cual transforma la importancia relativa de los factores que condicionan la aparición de movimientos en masa en zonas de amenaza, basándose en las evaluaciones subjetivas realizadas por expertos (*Saaty et al., 2001*). Para ello, se utiliza una matriz comparativa entre las variables condicionantes, siguiendo la escala de evaluación e importancia sugerida por *Saaty et al., (1980)*, que asigna valores que van del 1 al 9 (ver Tabla 1).

Escala	Descripción
1	Igualmente, importante.
3	Moderadamente importante.
5	Fuertemente importante.
7	Muy fuertemente importante.
9	Extremadamente importante.
2,4,6 y 8	Valores intermedios de importancia.

Tabla 1. Escala de comparación AHP. Modificada de *Saaty et al., (1980)*.

Para la evaluación mediante este método, se debe asignar un peso a variables como la geología, geomorfología, pendientes, relieve relativo, rugosidad, cobertura y curvatura. Este peso se basa en la opinión de los expertos y puede variar.

3.2. Métodos Estadísticos

En los análisis estadísticos se integran diversos factores que, históricamente, han sido responsables de desencadenar dichos eventos y que pueden ser evaluados de manera estadística. Esto permite realizar predicciones cuantitativas para áreas que no han experimentado movimientos en masa, pero que presentan condiciones similares. Existen tres enfoques principales para este tipo de análisis: el bivariado, univariado y el multivariado (SGC, 2013).

3.2.1. Análisis estadístico bivariado (Peso de la evidencia)

El método estadístico bivariado conocido como "Weight of Evidence" (WoE) analiza la relación entre dos eventos (Sujatha et al., 2014). Este enfoque compara la relación entre las zonas impactadas por estos fenómenos y la distribución espacial de los factores que condicionan el terreno (van Westen et al., 2003). El principio fundamental de este método consiste en calcular los pesos de las clases que forman parte de las variables condicionantes en la ocurrencia, los cuales reflejan la influencia de cada clase de los movimientos en masa (Dahal et al., 2008). Estos pesos pueden ser tanto positivos (W+) como negativos (W-). Un peso positivo (W+) refleja la presencia de una clase como un factor que favorece el desencadenamiento de movimientos en masa, y su valor indica el grado de correlación. Por otro lado, un peso negativo (W-) señala la ausencia de la clase en cuestión. Si el peso es cero, significa que la clase analizada no tiene relevancia en el fenómeno de movimientos en masa. Los pesos son determinados mediante la fórmula (1) (Ozdemir et al., 2013)

$$W^+ = \ln \frac{\frac{A1}{A1 + A2}}{\frac{A3}{A3 + A4}} \quad W^- = \ln \frac{\frac{A2}{A1 + A2}}{\frac{A4}{A3 + A4}} \quad (1)$$

A1 representa el número de píxeles en la clase donde ocurren movimientos en masa, mientras que A2 corresponde al número de píxeles con movimientos en masa que no pertenecen a dicha clase. A3 se refiere a la cantidad de píxeles en la clase donde no se observan movimientos en masa, y A4 corresponde a los píxeles donde no ocurren movimientos en masa y que no pertenecen a la clase analizada. (SGC, 2014).

3.2.1. Análisis estadístico univariado

Este método asigna un peso o fragilidad a cada unidad de terreno en función de su susceptibilidad a generar movimientos en masa. Las principales unidades de análisis incluyen principalmente características como geología, geomorfología, cobertura del suelo, pendiente, rugosidad, relieve relativo y curvatura (*Nahayo et al., 2018*). Este método es especialmente útil en áreas donde se dispone de un registro detallado de deslizamientos recientes y pasados.

La influencia o peso que cada factor interno del terreno ejerce en la generación de movimientos en masa se establece al calcular la suma de las áreas de cada tipo de movimiento en masa presentes dentro de las áreas que cubre cada unidad cartográfica de parámetro, usando la ecuación (2) (*Qi et al., 2024*)

$$W = DZX/S \quad (2)$$

En esta fórmula, W representa el peso o la susceptibilidad de la unidad en relación con el movimiento en masa analizado; DZX corresponde a la superficie acumulada de movimiento en masa de tipo X (en m²) que se encuentra dentro de la unidad; y S es la superficie total de la unidad (en m²).

3.2.2. Análisis estadístico multivariado (Modelo de regresión lógica)

El método estadístico multivariado conocido como regresión lógica (RL) busca estimar la relación entre una variable dependiente dicotómica (es decir, que toma los valores 0 para "no ocurrencia" y 1 para "ocurrencia" de movimientos en masa) y un conjunto de variables independientes, en este caso, factores condicionantes del terreno. Una de las principales ventajas de la RL es que las variables predictoras no necesitan seguir una distribución normal, y pueden ser tanto discretas (solo toma un número finito de valores) como continuas (puede tomar un número infinito de valores), o una mezcla de ambas (*Australian Geomechanics Society, 2007*). La relación entre la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa y las variables independientes se expresa cuantitativamente en la ecuación (3).

$$P(y) = 1/(1 + e^{-z}) \quad (3)$$

Donde P(y) representa la probabilidad estimada de que se produzca un movimiento en masa, oscilando entre 0 y 1. La variable z es una combinación lineal de las variables independientes, tal como se muestra en la ecuación (4):

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_nx_n \quad (4)$$

b_0 es el término de intersección en el modelo de RL, los coeficientes b_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) representan los pesos asignados a cada variable independiente, y los valores x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) corresponden a las variables predictoras. El modelo final se construye como una regresión lógica que predice la ocurrencia (o ausencia) de movimientos en masa a partir de dichas variables (*Australian Geomechanics Society, 2007*).

3.3. Método Determinístico

El método determinístico es uno de los más usados en el campo de la geotecnia (fines constructivos), ya que este método utiliza análisis mecánicos y modelos de estabilidad para determinar el factor de seguridad (*Barred et al., 2000*). Este método es el que expresa los resultados más precisos, Sin embargo, requieren la disponibilidad de datos geotécnicos y de agua subterránea muy detallados, y pueden conducir a una simplificación excesiva si dichos datos solo están disponibles parcialmente (*Barredo et al., 2000*). Además, este método es más adecuado para evaluar la inestabilidad en áreas pequeñas (una única ladera) (*Van Westen et al., 2003*).

El enfoque más común para analizar movimientos en masa traslacionales es mediante la aplicación del modelo de talud infinito, que permite evaluar la estabilidad del terreno bajo determinadas condiciones (*li et al., 2024*)

3.3.1. Talud infinito

El método de talud infinito es una técnica utilizada en la geotecnia para analizar la estabilidad de taludes o laderas extensas, asumiendo que el talud es infinitamente largo y que las condiciones a lo largo de su sección transversal son uniformes (*Terzaghi et al., 1995*). Este método simplifica los cálculos al descomponer las fuerzas actuantes en el talud en componentes de peso, resistencia al deslizamiento y fuerzas externas. Se usa comúnmente para evaluar deslizamientos de suelos o rocas superficiales. *Varnes et al., (1978)*, asume que "el talud falla a lo largo de una superficie paralela al terreno", lo que permite realizar análisis rápidos en condiciones homogéneas.

Al ser un método tan exacto, requiere gran disposición de datos, como Ángulo del talud (β), peso unitario del suelo (γ), profundidad de la capa inestable (h), cohesión del suelo (c), ángulo de fricción interna del suelo (ϕ) y la presión de poros (u) (*Das et al., 2010*).

3.4. Método basado en el entrenamiento y la simulación (IA)

Este enfoque emplea algoritmos avanzados para "entrenar" sistemas computacionales a partir de grandes conjuntos de datos, simulando su comportamiento en distintas situaciones o escenarios, permitiendo analizar fenómenos complejos como los movimientos en masa (*Russell et al., 2020*). Este método se aplica mediante las redes neuronales (RNA) (*SGC, 2013*)

3.4.1. Redes neuronales (ANN)

La red neuronal artificial (ANN) es un enfoque de aprendizaje automático que se utiliza para generar nueva información mediante el análisis y procesamiento de relaciones en datos como un algoritmo genérico de aproximación de función no lineal (*Can et al., 2019*). Este método procesa datos de acuerdo con el peso de la conexión, enviando los resultados a una nueva capa que dará como resultado el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa (*Li et al., 2021*). Este método consta de tres componentes principales, como se muestra en la Figura 1. La capa de entrada (input layer) la cual se construye de acuerdo con los factores de condicionamiento de deslizamientos de tierra; la capa oculta (hidden layer) responsable de procesar y transformar los datos de entrada a datos de salida, y por último una capa de salida, la cual da como resultado las zonas con presencia de movimientos en masa (*Norsakinah et al., 2022*).

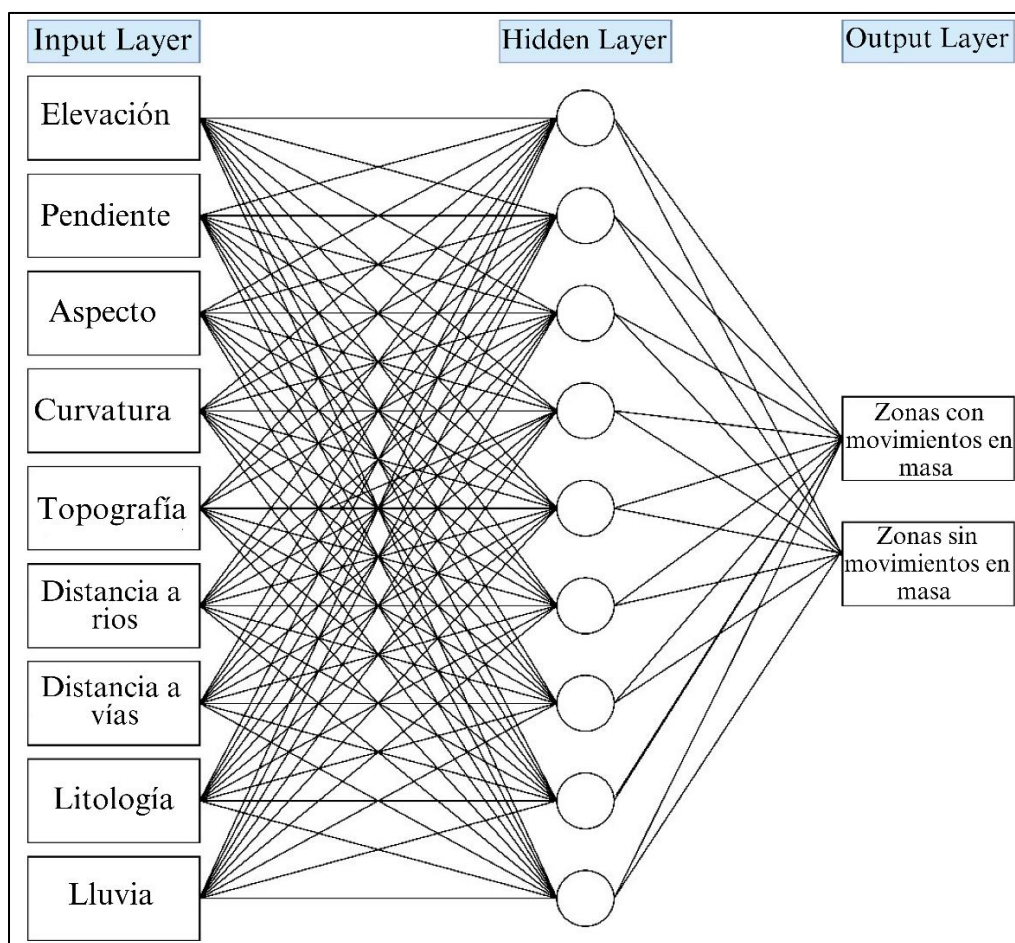


Figura 1. Estructura de la red neuronal. Modificado de (Norsakinah, 2022).

4. Comparación de casos de estudio

A continuación, se presentará un análisis comparativo de diversos casos de estudio que han implementado las metodologías anteriormente mencionadas para la identificación y evaluación de movimientos en masa. La intención de esta sección es ilustrar cómo cada método se adapta a distintas condiciones geológicas y ambientales, y qué resultados se obtienen en función de la complejidad de cada técnica.

4.1. Caso de estudio 1: heurístico, estadístico multivariado y red neuronal

(Francipane, 2014)

Francipane et al., (2014) realizó la comparación de tres metodologías (heurístico, estadístico multivariado y redes neuronales) en la ciudad de Mesina, Italia, obteniendo lo siguientes mapas de susceptibilidad por movimiento en masa. (Ver Figura 2)

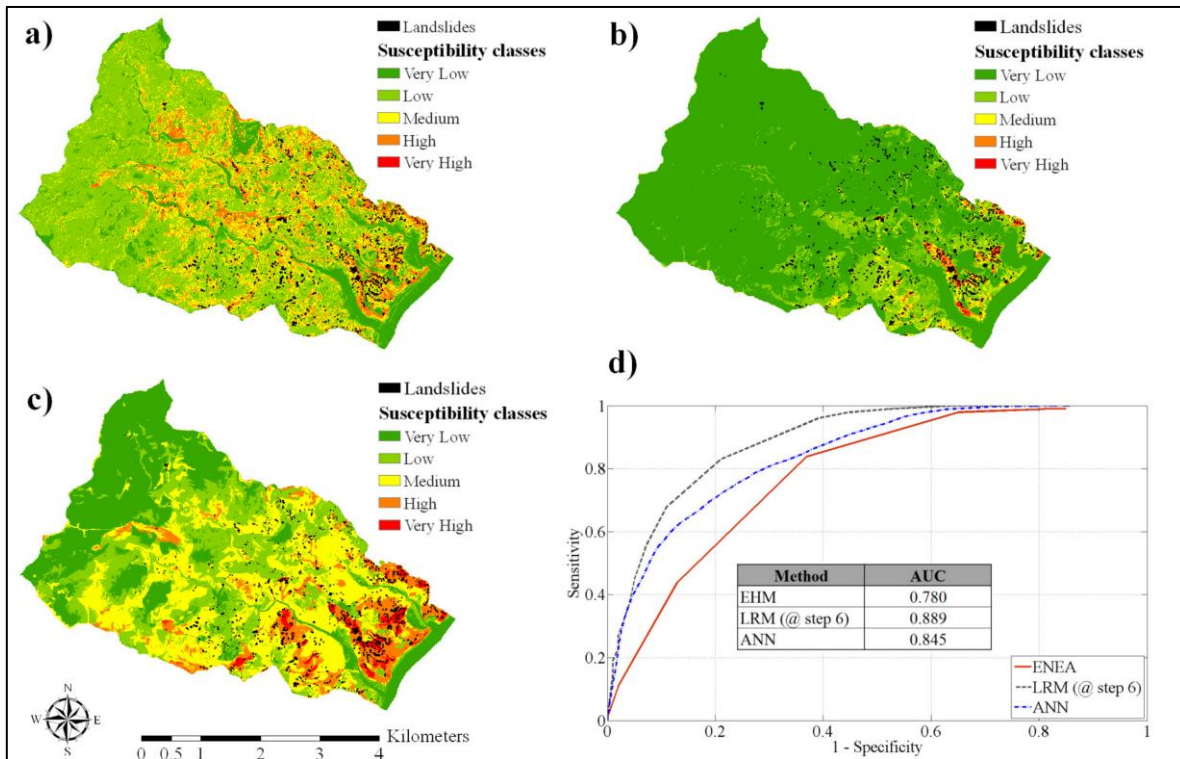


Figura 2. Mapas de susceptibilidad mediante metodologías **a)** heurístico, **b)** estadístico multivariado, **c)** redes neuronales, **d)** curva AUC. Tomado de (Francipane et al., 2014)

En el análisis comparativo realizado por *Francipane et al., (2014)*, se concluyó que el método estadístico multivariado (regresión lógica) fue el más adecuado para la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa, superando tanto al enfoque heurístico como al basado en redes neuronales. El método estadístico multivariado (regresión lógica) no solo mostró una alta precisión en la identificación de zonas de riesgo, con un valor de AUC de 0.89, sino que también permitió interpretar mejor la influencia de los factores condicionantes. Aunque la metodología basada por redes neuronales obtuvo una curva AUC muy similar al método estadístico multivariado, este no ofrece posibilidad de hacer consideraciones sobre cada factor causante de deslizamientos, algo que el método estadístico multivariado si ofrece, ayudando a comprender mejor las relaciones físicas entre factores y fenómenos modelados. Por último, el método heurístico arrojó los peores resultados, con un valor de 0.78 en la curva AUC, esto, debido a la subjetividad que este método presenta.

4.2. Caso de estudio 2: Estadístico multivariado y red neuronal (Pourghasemi, 2020)

Pourghasemi et al., 2020 realizó la comparación de estos modelos en la provincia de Kurdistan, Irán, utilizando factores de condicionamiento geológico, hidrológico y topográfico para predecir la probabilidad de deslizamientos, obteniendo las siguientes salidas gráficas. (Ver Figura 3)

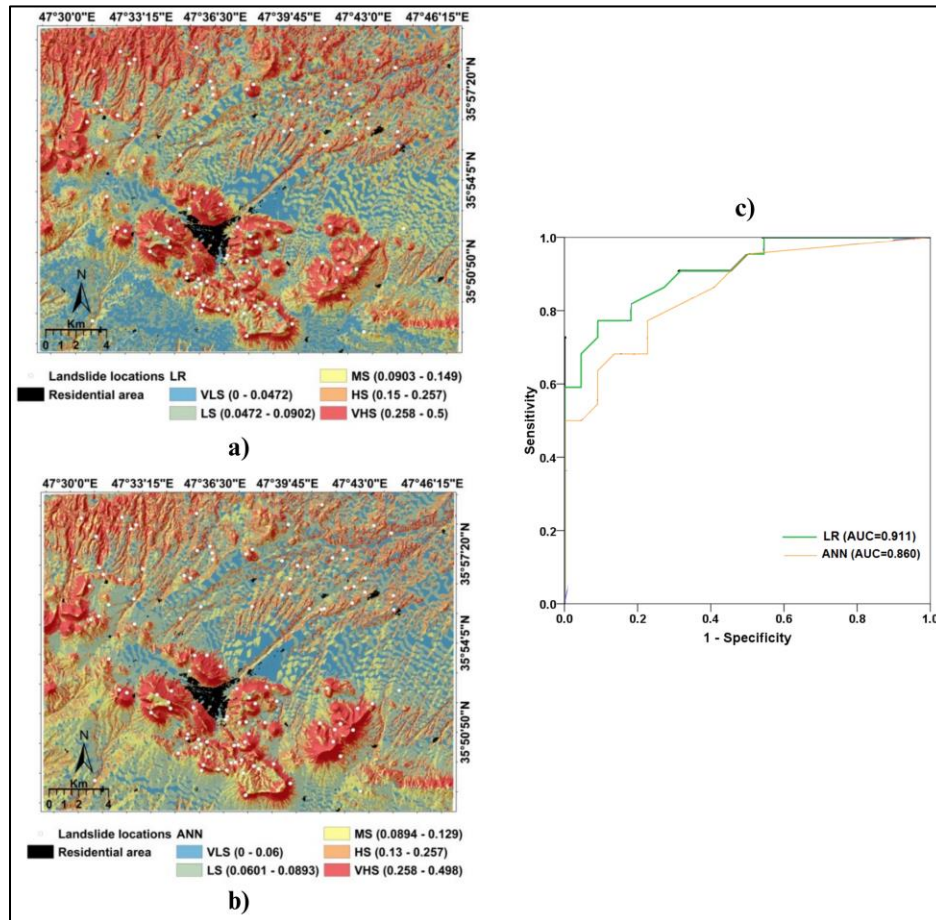


Figura 3. Mapas de susceptibilidad mediante metodologías, **a)** estadístico multivariado, **b)** redes neuronales, **c)** curva AUC. Tomado de (*Pourghasemi et al., 2020*)

Pourghasemi et al., (2020) Concluyó que el modelo estadístico multivariado basado en la regresión lógica (LR) mostró ser el más preciso, obteniendo los valores más altos en la curva AUC (0.911). Este método tuvo una alta precisión, simplicidad en la implementación, y capacidad para trabajar con conjuntos de datos complejos (*Pourghasemi et al., 2020*).

Por otro lado, el método de redes neuronales artificiales (ANN) mostró un rendimiento inferior debido a su necesidad de grandes volúmenes de datos y alta demanda computacional, obteniendo valores de 0.860 en la curva AUC. Aunque el modelo ANN es muy útil en ciertos contextos, no proporcionó una mejora significativa en este estudio, presentando dificultades en el ajuste de los datos y una menor precisión general en la predicción de deslizamientos en comparación con la LR (*Pourghasemi et al., 2020*).

4.1. Caso de estudio 3: estadístico bivariado y estadístico multivariado (Aristizábal, 2019)

Aristizábal et al., (2019) implementó y comparó la precisión de los enfoques de los métodos estadísticos bivariado y multivariado para el Valle de Aburrá, en Antioquia, teniendo en cuenta la capacidad de predicción y su aplicabilidad en la zona de estudio. En la Figura 4 se muestran las dos salidas gráficas obtenidas por *Aristizábal et al., (2019)*.

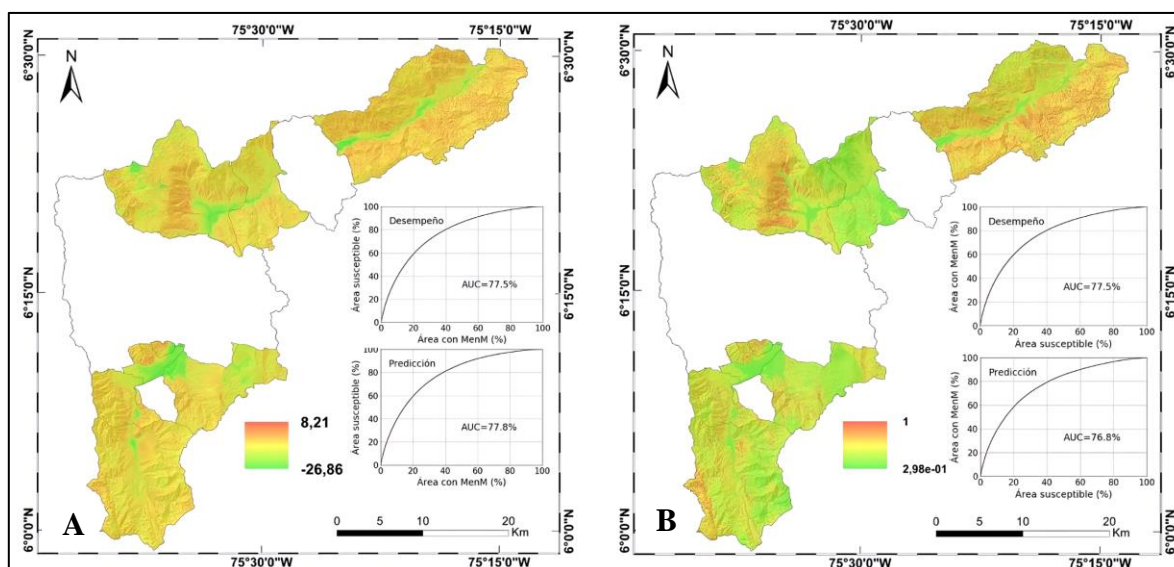


Figura 4 Mapas de susceptibilidad a) método estadístico multivariado b) método estadístico bivariado. Aristizábal (2019)

Ambos métodos mostraron resultados similares, con una capacidad predictiva destacada en la identificación de áreas de alta susceptibilidad. Sin embargo, método estadístico multivariado (Regresión lógica) demostró una ligera ventaja al presentar una precisión superior en la clasificación de zonas susceptibles, alcanzando un valor de área bajo la curva (AUC) del 77.8%, en comparación con el 76.8% obtenido por el método estadístico bivariado (Peso de la Evidencia, WoE) (*Aristizábal et al., 2019*).

Aun así, el autor definió a el método estadístico bivariado (Peso de la Evidencia, WoE) como la mejor opción, ya que este método mostró un mejor ajuste en cuanto al inventario de movimientos en masa, además, este método se justifica por su robustez en el análisis de factores condicionantes individuales y su facilidad para asignar pesos significativos a cada clase dentro de las variables, lo cual mejora la discriminación espacial de las áreas vulnerables.

4.2. Caso de estudio 4: heurístico y estadístico univariado (González, 2015)

González (2015) realiza una comparación de las metodologías basadas en lo heurístico y en lo estadístico univariado para la zonificación de amenazas por movimientos en masa en el municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Para ambos métodos, *González (2015)* obtuvo las siguientes salidas gráficas. (Ver Figura 5)

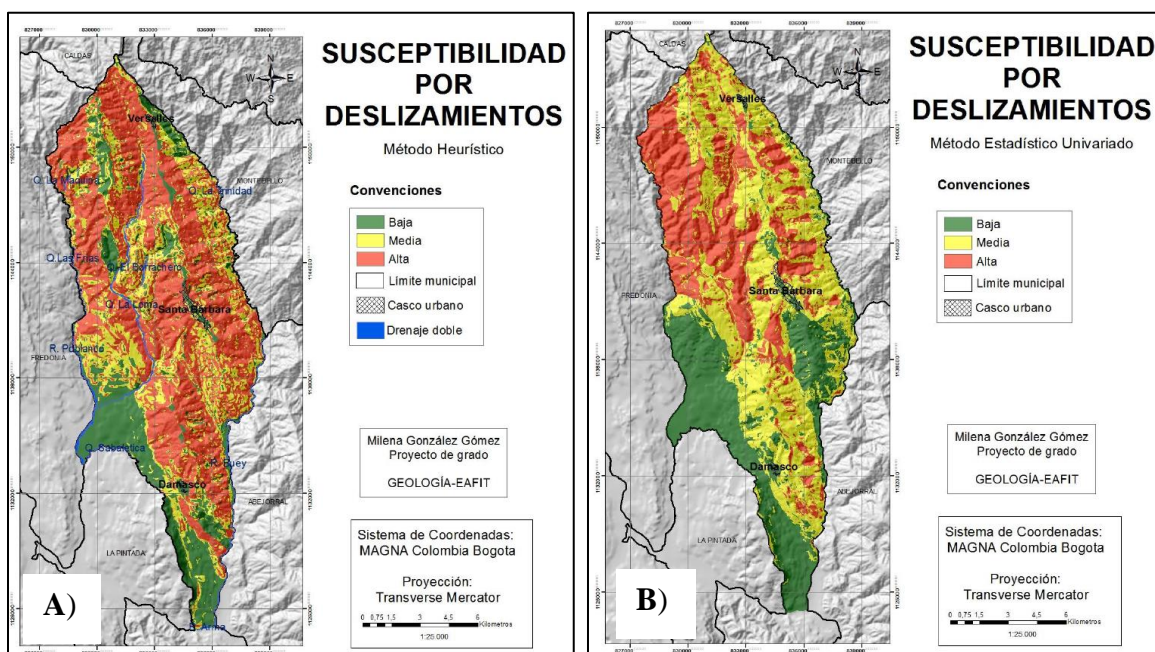


Figura 5. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos, **a)** método heurístico, **b)** método estadístico. González (2015).

La Tabla 2 muestra los porcentajes y áreas obtenidos mediante el método heurístico. (52,49%) corresponde a zonas de alta susceptibilidad y las zonas de susceptibilidad media y baja ocupan un 25,45% y un 22,06%, respectivamente, *González (2015)*.

Susceptibilidad	Área total (ha)	Porcentaje (%)	
Alta	9404	52,49	
Media	4560	25,45	
Baja	3951	22,06	

Tabla 2. Áreas y porcentajes método heurístico. Modificado de Gonzáles (2015).

Asimismo, la Tabla 3 muestra los porcentajes y áreas obtenidos mediante el método estadístico. (30,99%) corresponde a zonas de alta susceptibilidad y las zonas de susceptibilidad media y baja ocupan un 42,88% y un 26,12%, respectivamente, *Gonzáles (2015)*,

Susceptibilidad	Área total (ha)	Porcentaje (%)	
Alta	5553	30,99	
Media	7683	42,88	
Baja	4679	26,12	

Tabla 3. Áreas y porcentajes método estadístico. Modificado de Gonzáles (2015).

En el estudio, se observó que el método heurístico tiende a sobreestimar las áreas de alta susceptibilidad debido a la subjetividad en la asignación de pesos, mientras que el método estadístico produce una zonificación más ajustada y con menor área acumulada de susceptibilidad alta. Además, *Gonzáles (2015)* concluyó que el método estadístico reflejó una mayor concentración de áreas de alta amenaza en las proximidades de los eventos históricos registrados, donde este método destacó por su capacidad para combinar factores condicionantes, como la geología, la pendiente y la cobertura vegetal, con la frecuencia de los movimientos en masa, permitiendo identificar con mayor exactitud las áreas vulnerables. Este enfoque minimizó el sesgo personal y proporcionó resultados más replicables.

4.3. Caso de estudio 5: heurístico y estadístico bivariado (Ramírez, 2017)

Ramírez (2017) realizó la zonificación por movimientos en masa bajo el enfoque heurístico y el estadístico bivariado para la zona de Río Tapias, en el departamento de Cauca, obteniendo las siguientes salidas graficas. (ver Figura 6)

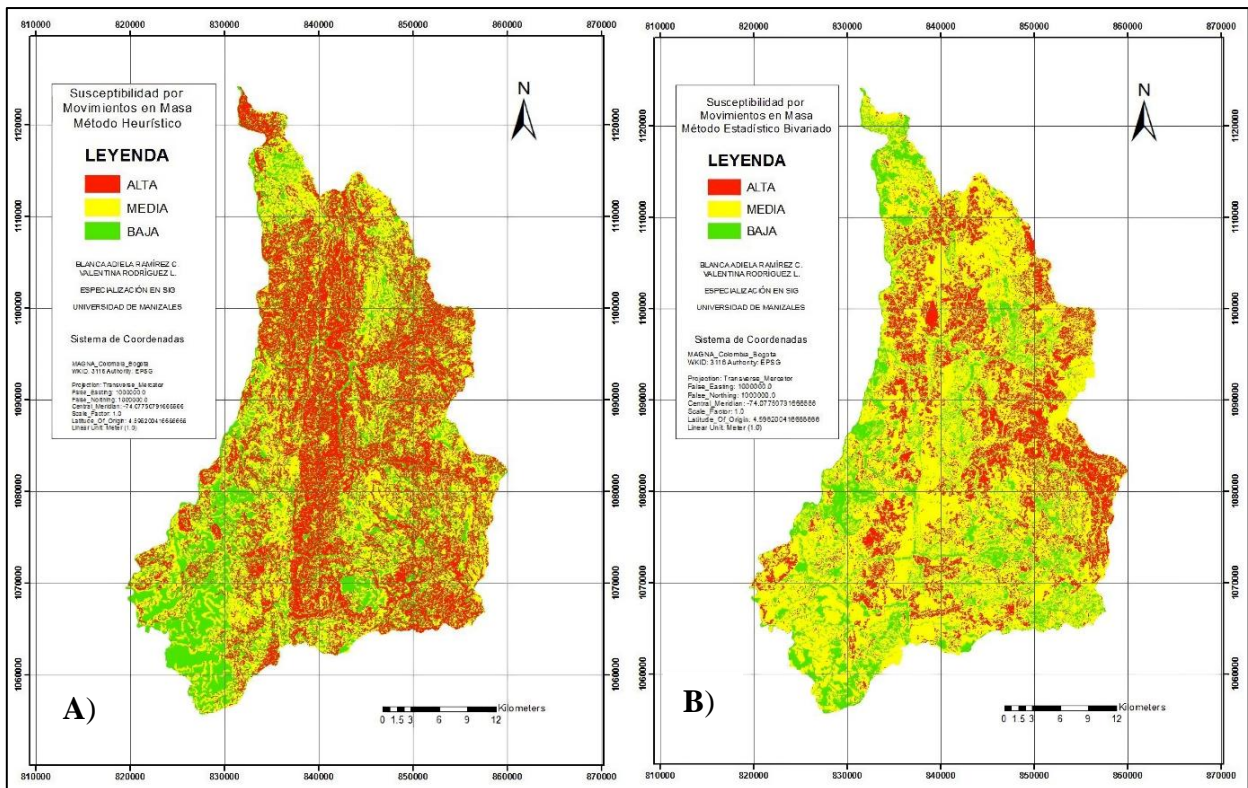


Figura 6. a) mapa de susceptibilidad por deslizamientos, método heurístico. **b)** mapa de susceptibilidad por deslizamientos, método estadístico bivariado. Ramírez (2017).

Las áreas obtenidas mediante el método heurístico por Ramírez, (2017), corresponden a un 40% para las zonas de alta susceptibilidad, un 36% para las zonas de susceptibilidad media y un 24% para las zonas de susceptibilidad

Para el método estadístico bivariado, Ramírez, (2017) obtuvo un 21% corresponde a zonas de alta susceptibilidad y las zonas de susceptibilidad media y baja ocupan un 62% y un 17%, respectivamente.

En el estudio, Ramírez (2017) menciona que el método estadístico bivariado se considera más confiable y se ajusta más a la realidad de la zona estudiada, ya que, al hacer una revisión, las áreas definidas como de alta susceptibilidad coinciden con aquellos procesos de

inestabilidad y con factores que favorecen estos procesos tales como laderas inclinadas de altas pendientes, zonas cubiertas por cultivos y áreas con la presencia de rocas con baja resistencia a la erosión.

Ramírez (2017) además concluye que el método heurístico es más conservador, presentando un área con mayor afectación por los procesos de inestabilidad pero que en algunos puntos no coinciden con aquellas zonas que favorecen estos procesos.

5. Discusión

El análisis comparativo de las metodologías basado en lo heurístico, estadístico y basado en el entrenamiento y la simulación para la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa muestra resultados claros en cuanto a la precisión y aplicabilidad de cada enfoque. En términos generales, los métodos heurísticos ofrecen un enfoque rápido y sencillo, pero su dependencia del juicio experto introduce un sesgo significativo que puede afectar la precisión en la identificación de zonas debido al peso que cada profesional asigna a cada variable. Esto es consistente con estudios previos que sugieren que los métodos basados en juicio experto tienden a sobreestimar las áreas de riesgo, como se observa en los análisis de *González (2015)*, *Francipane et al., (2014)* y *Ramírez (2017)*, donde el método heurístico fue el que más se alejó de la realidad en sus resultados.

Los métodos estadísticos, tanto bivariado como univariado, demostraron ser más precisos y replicables en todos los casos de estudio. Los resultados obtenidos con la regresión lógica (LR) fueron superiores en cuanto a la precisión de predicción, con un área bajo la curva (AUC) de 0.89 en el estudio de *Francipane et al., (2014)*, 0.911 en el estudio de *Pourghasemi et al., (2020)*, siendo ambas metodologías las más precisas en las comparaciones realizadas por los autores. Este método permitió una evaluación más objetiva y una mejor interpretación de la influencia de cada variable condicionante en la inestabilidad del terreno, ya que este método no requiere que las variables sigan una distribución normal, permitiendo trabajar con diferentes tipos de datos, lo que la hace altamente flexible para modelar la susceptibilidad a movimientos en masa. Además, según *Pourghasemi et al., (2020)*, El modelo de regresión lógica obtuvo la mayor especificidad y precisión, lo que significa que fue capaz de clasificar correctamente tanto los píxeles con deslizamientos como los sin deslizamientos, con una alta probabilidad de categorización correcta. Por otro lado, los resultados obtenidos por

Aristizábal et al., (2019), mostraron que tanto las metodologías bivariado y multivariado mostraron resultados muy similares, siendo el peso de la evidencia (WoE) el más efectivo frente al modelo de regresión lógica (RL) debido a parámetros mínimos escogidos por el autor. Este método minimiza el sesgo personal al basarse en datos cuantitativos y correlaciones entre factores condicionantes como la geología, pendiente, geomorfología y cobertura del suelo, con la frecuencia de los movimientos en masa y eventos históricos.

El método determinístico, a pesar de ser el más preciso debido a la cantidad de datos y estudios de laboratorio que se necesita para su interpretación (*Das et al., 2010*), solo se limita a estudios geotécnicos de pequeña escala. Además, su enfoque en los aspectos físicos del terreno no permite una evaluación global de todos los factores condicionantes, como lo hacen los métodos estadísticos o heurísticos. Por ello, aunque es altamente efectivo para evaluar la estabilidad en escalas locales, no es práctico para estudios de susceptibilidad a gran escala, donde otros enfoques ofrecen una mejor relación entre precisión y aplicabilidad.

Por último, los métodos basados en inteligencia artificial, como las redes neuronales artificiales (RNA), aunque ofrecen un alto potencial en términos de predicción, presentan limitaciones importantes. Como se observó en el estudio de *Pourghasemi et al., (2020)*, las RNA requieren grandes volúmenes de datos y tienen una alta demanda computacional. Además, su naturaleza limita la interpretabilidad de los resultados, donde no es posible hacer consideraciones sobre cada factor causante de los movimientos en masa, lo que dificulta su uso en contextos donde la comprensión de los factores es fundamental para la toma de decisiones informadas sobre la mitigación de riesgos *Francipane et al., (2014)*. La Figura 7, muestra un comparativo de precisión (AUC) por metodología y estudio resaltando las diferencias en la capacidad predictiva de cada enfoque.

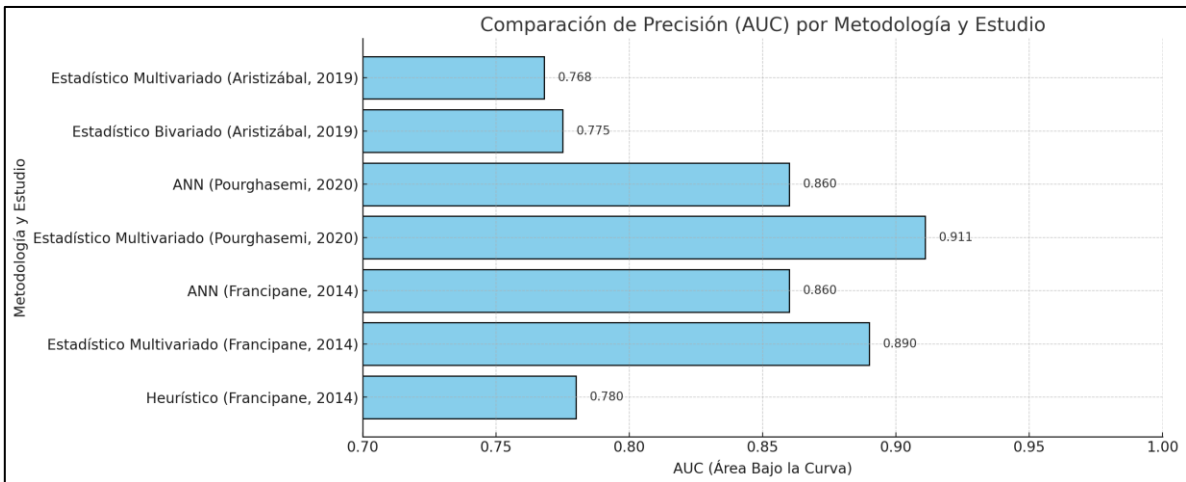


Figura 7. Comparación de Precisión (AUC) por metodología y estudio. Elaboración propia.

La evidencia presentada en este trabajo muestra que, los métodos estadísticos ofrecen un balance adecuado entre precisión, capacidad y reducción del sesgo en la interpretación, lo que los convierte en una opción viable para la zonificación de amenazas geológicas en comparación con los demás métodos. Aun así, la elección del método más adecuado dependerá de los datos disponibles y los objetivos específicos del estudio. En la Tabla 4, se presenta un resumen de las principales metodologías utilizadas en el análisis de susceptibilidad y amenaza geológica. Se describen las ventajas y limitaciones asociadas a cada tipo de metodología.

Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
Análisis heurístico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite extrapolar los resultados a zonas con características similares. 2. Es un método de rápida ejecución y efectivo para mapas a gran escala. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Su eficacia depende de la experiencia y el conocimiento del experto. 2. Requiere de un trabajo de campo en zonas que pueden llegar a ser de difícil acceso.
Análisis estadístico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite realizar predicciones cuantitativas para áreas que no han experimentado movimientos en masa. 2. Muy efectivo en mapas de gran escala. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Depende en gran medida de la calidad y cantidad de los datos históricos disponibles.
Análisis determinístico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Expresa resultados muy precisos para los análisis geotécnicos. 2. Se pueden hacer predicciones de comportamientos ante cambios de las condiciones de los materiales. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requiere una gran disponibilidad de datos geotécnicos muy detallados como ensayos de laboratorio. 2. Solo se puede aplicar a escalas muy pequeñas (laderas).
Análisis basado en entrenamiento y la simulación	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite simular distintos escenarios de riesgo a partir de diversos parámetros geológicos y ambientales 2. Permite crear y probar escenarios hipotéticos futuros, facilitando la toma de decisiones preventivas ante posibles situaciones de riesgo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limita la evaluación de los factores condicionantes. 2. Su aplicabilidad para el análisis de susceptibilidad aún no ha sido explorada al máximo.

Tabla 4. Tabla resumen metodologías para evaluación de susceptibilidad y amenaza. Elaboración propia.

6. Conclusiones

El presente trabajo se realizó con el objetivo de analizar y comparar diversas metodologías de zonificación de movimientos en masa, evaluando su precisión, aplicabilidad y limitaciones. Este enfoque es fundamental para la gestión del riesgo geológico, ya que permite seleccionar el método más adecuado en función de los datos disponibles y la escala de análisis requerida.

Se demostró que los métodos estadísticos, particularmente el análisis multivariado con regresión logística (LR), proporcionan los resultados más precisos y replicables. Estos métodos permiten manejar múltiples variables de manera objetiva, ofreciendo una interpretación clara de los factores que influyen en la inestabilidad del terreno, lo que los convierte en la opción más recomendada para estudios de susceptibilidad a deslizamientos a nivel regional.

Aunque los métodos heurísticos son rápidos y fáciles de implementar, su dependencia del juicio experto introduce un alto grado de subjetividad, lo que puede llevar a sobreestimar las áreas de riesgo. Por otro lado, los métodos determinísticos, aunque son altamente precisos para estudios geotécnicos a pequeña escala, requieren datos muy detallados y no son prácticos para evaluaciones a gran escala debido a su limitado alcance.

Los métodos basados en inteligencia artificial, como las redes neuronales artificiales (RNA), muestran un gran potencial en términos de predicción. Sin embargo, su alto requerimiento de datos y la complejidad en su interpretación hacen que, por el momento, no sean la opción más viable para estudios en áreas con datos limitados o en contextos donde se requiere una comprensión detallada de los factores causales.

Cuando sea necesario recomendar un método para evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa, es fundamental considerar la cantidad de información disponible para la implementación de cada metodología.

7. Bibliografía

- Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00083-1)
- Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32(4), 269-277. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(92\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(92)90053-2)
- Aristizábal, E. Vásquez, M. & Ruiz, D. “Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa”. *TecnoLógicas*, vol. 22, no. 46, pp. 39-60, 2019. <https://doi.org/10.22430/22565337.1247>
- Australian Geomechanics Society. (2007). *Landslide Risk Management*. *Australian Geomechanics*, 42(1), 1-168. <https://australiangeomechanics.org/>
- Baas, S., Ramasamy, S., Dey de Pryck, J., & Battista, F. (2008). *Análisis de sistemas de gestión del riesgo de desastres: Una guía*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/4/i0304e/i0304e00.htm>
- Barredol, J. I., Benavidez, A., Hervhl, J., & van Westen, C. J. (2000). Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain (Vol. 2).
- Brabb, E. E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides* (Vol. 1, pp. 307–324). Toronto, Canadá.
- Can, A., Dagdelenler, G., Ercanoglu, M., & Sonmez, H. (2019). Landslide susceptibility mapping at Ovacık-Karabük (Turkey) using different artificial neural network models: Comparison of training algorithms. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 89–102. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1164-2>
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. In A. Carrara & F. Guzzetti (Eds.), *Geographical*

Information Systems in Assessing Natural Hazards (pp. 135-175). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Cornell, A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*.

Corporación de cuencas Tolima. (2014). *POMCA Río Recio y Venadillo*.

Dahal, R. K., & Hasegawa, S. (2008). Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100(3–4), 429–443.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.014>

Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*.

Francipane, E., Arnone, F., Lo Conti, C., Puglisi, L., & Noto, V. A. (2014). A comparison between heuristic, statistical, and data-driven methods in landslide susceptibility assessment: An application to the Briga and Giampileri catchments. *CUNY Academic Works*. https://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/150

González, M. (2015). Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 en el municipio de Santa Bárbara, Departamento de Antioquia.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1–4), 272–299.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>

Kienholz, H. (1977). Kombinierte Geomorphologische Gefahrenkarte 1:10.000 von Grindelwald.

Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33–41.
<https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y>

Li, B., Wang, N., & Chen, J. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping using information, frequency ratio, and artificial neural network methods in Qinghai Province, Northwestern China. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 4758062.

- Li, G., Zang, M., Qi, S., Bo, J., Yang, G., & Liu, T. (2024). An infinite slope model considering unloading joints for spatial evaluation of coseismic landslide hazards triggered by a reverse seismogenic fault: A case study of the 2013 Lushan earthquake. *Sustainability*, 16(1), 138. <https://doi.org/10.3390/su16010138>
- Nahayo, L., Huang, X., & Cai, P. (2018). *Landslide Susceptibility Assessment Using Spatial Multi-Criteria Evaluation Model in Rwanda*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 243. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020243>
- Ozdemir, A., & Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence, and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180–197. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.014>
- Pourghasemi, H. R., Gayen, A., Panahi, M., Rezaie, F., Blaschke, T., & Moezzi, K. D. (2020). Shallow landslide susceptibility mapping using different GIS-based machine learning techniques. *Natural Hazards*, 103(3), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04057-w>
- Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson.
- Ramírez, J., & Giraldo, E. V. (2017). Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales: Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 173–206. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.7>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill International Book Co.
- Saaty, T. L. (2001). The seven pillars of the analytic hierarchy process. In M. Köksalan & S. Zionts (Eds.), *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium* (pp. 15-37). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56680-6_2
- SGC. (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*.

- Selamat, S. N., Majid, N. A., Taha, M. R., & Osman, A. (2022). Landslide susceptibility model using artificial neural network (ANN) approach in Langat River Basin, Selangor, Malaysia. *Land*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/land11060833>
- Stevenson, P. C. (1977). An empirical method for the evaluation of relative landslide risk. *Bulletin International Association of Engineering Geologists*, 16, 69-72.
- Sujatha, E. R., Kumaravel, P., & Rajamanickam, G. V. (2014). Assessing landslide susceptibility using Bayesian probability-based weight of evidence model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(1), 147–161. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0537-9>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1995). *Soil mechanics in engineering practice*.
- UNGRD. (2014). Metodologías para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa.
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30.
- Varnes, J. D. (1978). Slope movement types and processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 11-33.
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the World* (3rd ed.). University of California Press.
- Qi, X., Peng, B., & Wang, J. (2024). *Optimized Landslide Susceptibility Mapping and Modelling Using the SBAS-InSAR Coupling Model*. *Remote Sensing*, 16(16), 2873. <https://doi.org/10.3390/rs16162873>