

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA**

**“ANÁLISIS ESPACIAL MULTICRITERIO PARA DETERMINAR ZONAS
SUSCEPTIBLES DE DESLIZAMIENTO EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL”**

POR:

I. E. KAREN MERAZ MOLINA

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

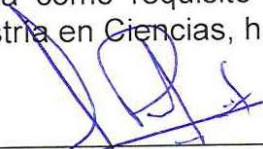
MAESTRÍA EN CIENCIAS

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

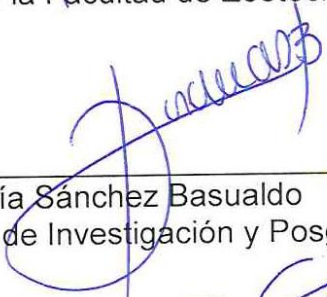
ENERO DE 2025



Análisis espacial multicriterio para determinar zonas susceptibles de deslizamiento en la sierra madre occidental. Tesis de maestría presentada por Karen Meraz Molina como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias, ha sido aprobado y aceptada por:



D.Ph. Alfredo Pinedo Alvarez
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología



Dra. Rosalía Sánchez Basualdo
Secretaria de Investigación y Posgrado



Dr. Lauro Manuel Espino Enríquez
Coordinador Académico Posgrado



D.Ph. Jesús Alejandro Prieto Amparán
Presidente del Comité

13-Enero-2025

Fecha:



Fecha: 03 de diciembre 2024

Después de haber reunido la revisión final del trabajo de tesina a nivel Maestría, bajo el nombre: "Análisis espacial multicriterio para determinar zonas susceptibles de deslizamiento en la Sierra Madre Occidental"

Elaborado por: Karen Meraz Molina

Los integrantes del comité están de acuerdo en que dicho trabajo satisface los requisitos para su publicación (indicándolo con una "X"), desde el punto de vista de:

Puesto en comité	Nombre y firma	Contenido Técnico	Análisis de la Información	Formato (estilo y forma)
Asesor:	Jesus Alejandro Pireto Anpash <i>[Firma]</i>	✓	✓	✓
Representante área relacionada:	Alfredo Pineda Alvarez <i>[Firma]</i>	✓	✓	✓
Representante área estadística:	Guadalupe Nelson Aguilar Palma <i>[Firma]</i>	✓	✓	✓
Representante de la coordinación:	Federico Villarreal Guerrero <i>[Firma]</i>	✓	✓	✓

[Firma]
Dr. Lauro Manuel Espino Enríquez
Unidad/Coordinación Académica
Vo. Bo.

Fecha actualización: octubre 2024

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Chihuahua y a la Secretaría de Investigación y Posgrado de la Facultad de Zootecnia y Ecología, por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios de maestría y apoyarme en mi formación académica y profesional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), cuyo apoyo fue fundamental para llevar a cabo mi trabajo de investigación y alcanzar este logro académico.

A los miembros de mi comité de grado, por su tiempo, dedicación, valiosas enseñanzas y las ideas que contribuyeron al desarrollo de esta investigación.

A mi asesor principal, D. Ph. Jesús Alejandro Prieto Amparán, por su paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. Sus enseñanzas, consejos y constante apoyo fundamentales para la realización de este trabajo, además marcaron mi formación profesional y personal.

Al Ph. D. Federico Villarreal Guerrero, por su valioso acompañamiento, por compartir sus conocimientos y experiencia, y por brindarme apoyo durante esta etapa.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de Benjamín M, quien con su ejemplo de fortaleza y dedicación me enseñó que, en la vida, como en la física, cada acción tiene una reacción igual y opuesta. Aunque ya no estás aquí, el impacto de tus acciones, tus palabras y tu amor sigue impulsándome hacia adelante. Tu legado vive en cada logro y decisión que tomo.

A mi madrina, una verdadera guerrera que enfrentó la adversidad con una valentía que solo puede compararse a la perseverancia necesaria para explorar lo desconocido. Como decía Marie Curie: "No hay que temer a nada en la vida, solo hay que entenderlo". Tú entendiste que la vida, incluso en sus momentos más difíciles, merece ser vivida con amor, dignidad y fuerza.

Ambos me enseñaron que la energía que damos al mundo nunca se destruye, solo se transforma.

CURRICULUM VITAE

El autor nació el 12 de mayo 1992 en la ciudad de Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

- | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2012-2016 | Estudios de Licenciatura en Ingeniería en Ecología de la Facultad de Zootecnia y Ecología. |
| 2016-2019 | Personal en el Departamento de Vida Silvestre como Técnico de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología en la Dirección de Ecología. |
| 2019-2022 | Supervisor sistema de gestión integral (SGA, SGS, SGC) en obras electromecánicas para la Comisión Federal de Electricidad. |
| 2022-2023 | Consultor Técnico Ambiental y en materia de Protección Civil para la Consultoría ULMA Asociados, SC. |

RESUMEN

ANÁLISIS ESPACIAL MULTICRITERIO PARA DETERMINAR ZONAS SUSCEPTIBLES DE DESLIZAMIENTO EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

POR:

I.E. KAREN MERAZ MOLINA

Maestría en Ciencias en Recursos Naturales

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: D. Ph. Jesús Alejandro Prieto Amparán

El análisis espacial y la evaluación de riesgos naturales son herramientas para la gestión del territorio y la mitigación de desastres. En este estudio, se analizó la susceptibilidad a deslizamientos en la Sierra Madre Occidental, Chihuahua, México, a través de la integración de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica (EMC-SIG). Para ello, se aplicaron cinco metodologías de ponderación de criterios: Proceso Analítico Jerárquico (AHP), AHP asistido por Inteligencia Artificial (AHP-IA), Ranking, Rating y Ponderación Equitativa, considerando 18 criterios agrupados en factores topográficos, biofísicos y de proximidad. Los resultados evidenciaron discrepancias significativas entre los modelos generados y el modelo de referencia de CENAPRED, particularmente en la identificación de zonas de alta susceptibilidad. Adicionalmente, se generaron mapas de susceptibilidad clasificados en cinco niveles, donde se observó que la metodología de ponderación impacta directamente en la distribución espacial del riesgo. Para evaluar la relación entre los niveles de susceptibilidad y los elementos

territoriales, se aplicaron tablas de contingencia, lo que permitió identificar patrones espaciales asociados a caminos, minas y localidades rurales. Sin embargo, una de las principales limitantes del estudio fue la ausencia de un inventario histórico de deslizamientos, lo que impidió una validación empírica más robusta. En este contexto, los resultados obtenidos proporcionan información para la planificación territorial y la prevención de riesgos.

ABSTRACT

Multicriteria Spatial Analysis to Determine Landslide-Susceptible Areas in the
Sierra Madre Occidental

BY:

I.E. KAREN MERAZ MOLINA

Spatial analysis and natural hazard risk assessment are essential tools for land management and disaster mitigation. This study analyzed landslide susceptibility in the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico, through the integration of Multicriteria Evaluation and Geographic Information Systems (MCE-GIS). To achieve this, five weighting methodologies were applied: the Analytic Hierarchy Process (AHP), AHP assisted by Artificial Intelligence (AHP-AI), Ranking, Rating, and Equal Weighting, considering 18 criteria grouped into topographic, biophysical, and proximity factors. The results revealed significant discrepancies between the generated models and the reference model from CENAPRED, particularly in the identification of high-susceptibility areas. Additionally, susceptibility maps were generated and classified into five levels, demonstrating that the weighting methodology directly influences the spatial distribution of risk. To assess the relationship between susceptibility levels and territorial elements, contingency tables were applied, allowing the identification of spatial patterns associated with roads, mines, and rural settlements. However, one of the main limitations of this study was the absence of a historical landslide inventory, which prevented a more robust empirical validation.

In this context, the results provide valuable information for territorial planning and risk prevention.

CONTENIDO

	Página
CURRICULUM VITAE	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE CUADROS	xiv
LISTA DE GRÁFICAS.....	xv
LISTA DE FIGURAS	xvi
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Peligros, Riesgos y Amenazas Naturales.....	4
Peligros Geológicos.....	6
Movimientos de Laderas.....	7
Clasificación de Deslizamientos	8
Deslizamiento.....	8
Coladas o flujos.....	8
Desprendimiento	8
Deslizamientos compuestos.....	9
Factores Condicionantes y Desencadenantes del Deslizamiento de Laderas	9
Factores Condicionantes	9

Geológicos	9
Hidrológicos e hidrogeológicos.....	9
Geomorfológicos	9
Climáticos.....	10
Factores Desencadenantes.....	10
Naturales	10
Actividades humanas	10
Gestión Integral del Riesgo de Desastre	10
Sistemas de Información Geográfica (SIG)	12
Importancia de los SIG en la Evaluación de Deslizamientos de Laderas	13
Aplicación de los SIG en la Evaluación de Deslizamientos de Laderas	13
Evaluación Multicriterio (EMC)	14
Principios de la Evaluación Multicriterio (EMC)	15
Metodologías de Ponderación	16
Aplicaciones de la Evaluación Multicriterio en la Gestión de Riesgos Naturales	18
Integración de SIG en la Evaluación Multicriterio	19
Tablas de Contingencia de Cruce de Información.....	20
MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
Área de Estudio	21

Localización.....	21
Fisiografía.....	21
Usos de suelo y vegetación.....	21
Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica (EMC-SIG)..	23
Selección de Criterios.....	23
Estandarización de Criterios.....	23
Ponderación de Criterios	26
Métodos de Ponderación Utilizados	30
Método de ponderación ranking.....	30
Método de rating	31
Proceso de análisis jerárquico (AHP).....	32
Proceso de jerarquía analítica (AHP) asistido por Inteligencia Artificial (IA)	37
Cálculo del Índice de Susceptibilidad (LSI).....	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
Selección y Estandarización de Criterios.....	40
Asignación de pesos.....	40
Distribución Espacial y Generación de Modelos.....	46
Tablas de Contingencia de Cruce de Información.....	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Criterios seleccionados para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de laderas.....	24
2	Estandarización de los criterios seleccionados que influyen en la susceptibilidad a deslizamiento de laderas.....	27
3	Escala de Saaty valores para asignación de pesos o importancias relativas en la comparación por pares.....	34
4	Valores del índice de coherencia aleatoria.....	36
5	Clasificación del Índice de Susceptibilidad a deslizamiento (LSI) para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de laderas.....	39
6	Distribución de pesos de los criterios según metodologías de ponderación para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos.....	47
7	Superficies clasificadas por nivel de susceptibilidad a deslizamientos según diferentes metodologías de ponderación.....	49
8	Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo de pesos iguales: Modelo Ponderación equitativa.....	60
9	Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo ranking.....	62
10	Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo rating.....	63
11	Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo AHP.....	64
12	Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo AHP-IA.....	65
13	Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo de referencia CENAPRED.....	67

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
1	Variaciones en los pesos o importancias de los criterios entre metodologías de ponderación para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos.....	48
2	Comparación de superficies clasificadas por nivel de susceptibilidad a deslizamientos según métodos de evaluación multicriterio.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización del área de estudio. (A) área de estudio, (B) Estado de Chihuahua, México (C).....	22
2	Estandarización de criterios. (a) Uso de suelo y vegetación, (b) magnitud del sismo, (c) precipitación media anual y (d) temperatura.....	41
3	Estandarización de criterios. (e) Localidades urbanas, (f) localidades rurales, (g) caminos principales, (h) caminos secundarios.....	42
4	Estandarización de criterios. (i) Pendiente del terreno, (j) sistema de topoformas, (k) geomorfología, (l) fallas y fracturas.....	43
5	Estandarización de criterios. (m) Edafología, (n) litología, (o) hidrografía, (p) vías férreas.....	44
6	Estandarización de criterios. (q) Incendios forestales, (r) densidad forestal.....	45
7	Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo AHP.....	53
8	Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo AHP-IA.....	54
9	Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo Pesos Iguales.....	55
10	Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo Ponderación equitativa.....	56
11	Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la	57

	sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo ponderación equitativa.....	
12	Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo de referencia CENAPRED.....	58



INTRODUCCIÓN

El cambio climático, el incremento de la población, los patrones de consumo no sostenibles, la disminución de la biodiversidad, la degradación del medio ambiente, entre otros, continúan generando un aumento y una mayor vulnerabilidad al riesgo de desastres (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020). En los últimos años a nivel mundial se ha observado un incremento en la frecuencia y magnitud de desastres naturales tales como tormentas, huracanes, frentes fríos, colapsos de terreno (socavones), deslizamientos, inundaciones, sequías, incendios forestales, y también de aquellos causados por actividades antropogénicas como el cambio de uso de suelo, la minería, construcción de infraestructura, entre otros, dando como resultado el aumento a la vulnerabilidad ante el riesgo de desastres (Almaguer, 2005).

Bajo estas condiciones, uno de los desastres naturales que constituye un grave peligro son los deslizamientos de laderas. Su ocurrencia es el resultado de la combinación de factores climáticos, geológicos, hidrológicos, actividades humanas, entre otros. Los deslizamientos de laderas se definen como los movimientos de talud debajo de materiales litológicos, que resultan de los movimientos hacia abajo y hacia afuera de los suelos, rocas y vegetación, bajo la influencia de la gravedad (Varnes, 1958). Son eventos que ocurren de manera repetida y dependiendo de su velocidad y magnitud, pueden representar un riesgo. De acuerdo con Guzzetti *et al.* (2012), la inestabilidad de laderas es una de las principales causas de fatalidades debido a fenómenos naturales. Usualmente los deslizamientos pueden ocurrir como fallas de laderas de cerros,



cañadas, barrancas y riberas de ríos, cortes y terraplenes de carreteras, minas a cielo abierto y bancos de materiales, así como en excavaciones para la construcción (Mendoza *et al.*, 2002).

En este sentido la gestión de los riesgos y peligros asociados a los deslizamientos de ladera se deben monitorear mediante la detección temprana y generar cartografía de estos eventos, lo cual proporciona una base para comprender su ocurrencia espacial y temporal (Carrara, 1976). La cartografía de la susceptibilidad a deslizamientos implica evaluar la propensión de que ocurran deslizamientos en función de diversos factores condicionantes en una región específica (Hong *et al.*, 2016). Hasta ahora, existe poca investigación en México sobre la susceptibilidad a deslizamientos, y en especial en una escala regional en el norte de México. La cartografía para los deslizamientos muestra una clasificación de la estabilidad relativa de un área en diferentes categorías, a las que se les asigna una categoría en escala numérica, utilizando distintos criterios para el análisis de peligros y riesgos, mostrando el grado en cuanto a las condiciones que el terreno muestra por inestabilidad de laderas.

En apoyo a la evaluación de la susceptibilidad y riesgo en cuanto al deslizamiento por inestabilidad de laderas, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) dan soporte mediante la generación de cartografía y análisis de la variación espaciotemporal, lo que permite el manejo de información georreferenciada y la elaboración de numerosos análisis con diferentes combinaciones para encontrar las áreas con mayor grado de susceptibilidad (González *et al.*, 2015).



Por otro lado, la integración de la Evaluación Multicriterio en combinación con los Sistemas de Información Geografía (EMC-SIG), se han vuelto cada vez más relevante para respaldar decisiones y el interés en esta unión está en aumento, abordando una variedad de problemas espaciales (Steele *et al.*, 2009). La combinación entre la EMC y las capacidades del SIG se debe a la habilidad de estos sistemas para manejar grandes volúmenes de datos georreferenciados complejos, provenientes de diversas fuentes y escalas espaciales y temporales, lo que permite un análisis eficiente y en tiempo real (Romano *et al.*, 2015).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo de investigación es identificar las zonas y su grado de susceptibilidad a deslizamientos en la Sierra Madre Occidental, a través de Evaluación Multicriterio. Los objetivos específicos son 1) identificar los criterios a evaluar, 2) definir pesos o importancias de los criterios mediante distintos métodos de ponderación: ranking, rating, Proceso de Jerarquía Analítica (por sus siglas en inglés AHP), Proceso de Jerarquía Analítica asistido con Inteligencia Artificial (AHP-IA) y ponderación equitativa y 3) generar la cartografía de susceptibilidad al deslizamiento. Esta integración de múltiples criterios (naturales y antrópicos) a través del análisis espacial EMC-SIG permitirá identificar con mayor detalle las zonas y su grado de susceptibilidad a deslizamientos en la Sierra Madre Occidental, al norte de México.



REVISIÓN DE LITERATURA

Peligros, Riesgos y Amenazas Naturales

Un peligro se define como cualquier proceso, fenómeno o actividad humana con el potencial de provocar muertes, lesiones, o afectar la salud de las personas, así como causar daños a la propiedad, interrupciones sociales y económicas, o deterioro del medio ambiente. Los peligros pueden clasificarse en diferentes categorías, dependiendo de su origen, siendo los naturales (terremotos, huracanes, sismos), antropogénicos (derrames químicos o accidentes industriales), y socio-naturales (inundaciones exacerbadas por la deforestación) (UNISDR, 2017; Smith, 2013).

El concepto de riesgo natural integra la interacción entre un fenómeno natural, o amenaza, y la vulnerabilidad de los bienes y personas expuestas. Según Keller y DeVecchio (2016), el riesgo es la probabilidad de que un evento natural tenga consecuencias negativas, como pérdidas humanas, daños materiales y afectaciones. Así, el riesgo depende tanto de la intensidad del peligro como del grado de vulnerabilidad, determinado por factores socioeconómicos, culturales y ambientales (Cutter *et al.*, 2003). Los riesgos naturales son aquellos conocidos como tormentas, inundaciones, sequías, terremotos, tsunamis, deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas, entre otros. La mayoría de los fenómenos naturales se entienden por la teoría de tectónica de placas, que es una explicación que describe los movimientos de la corteza terrestre. Además, otros procesos asociados con los riesgos naturales surgen por la acción de fuerzas externas en la superficie de la Tierra o muy cercana a ella. Un ejemplo de estas fuerzas es la energía solar, que calienta la atmósfera y la superficie del



planeta generando vientos y provocando la evaporación del agua. Este proceso es el responsable de la formación de zonas climáticas y del movimiento en el ciclo hidrológico, dando lugar a la formación de fenómenos peligrosos como tormentas severas, inundaciones y erosión (Keller, 2004).

Los fenómenos naturales son procesos inherentes de los ciclos de la Tierra. Sin los fenómenos naturales, el planeta perdería el equilibrio que hace posible el mantenimiento de la vida. Los fenómenos naturales son inevitables e imprevisibles. Las comunidades tienen la responsabilidad de entenderlos, medirlos, ubicarlos en el tiempo y el espacio, así como tratar de estimar su potencial destructivo, y sobre todo adoptar medidas para reducir considerablemente los daños que pudieran ocasionar estos fenómenos. Para su mejor entendimiento es importante definir los siguientes términos: 1) amenaza, es la probabilidad de ocurrencia de un evento (huracanes, tormentas, sismos, deslizamientos) potencialmente dañino, dentro de un periodo dado y un área determinada, 2) peligro, es la intensidad en la que ocurre un fenómeno natural, 3) 3) susceptibilidad, se refiere a la probabilidad de que un área determinada sea propensa a sufrir daños por alguna amenaza natural, tomando en cuenta diversos criterios y condiciones del terreno, climáticas y antropogénicas, las cuales pueden influir en esta probabilidad, 4) vulnerabilidad, se refiere a las condiciones y características de una comunidad, infraestructura o área, las cuales pueden aumentar o disminuir su susceptibilidad en cuanto a sufrir daños frente a eventos naturales potencialmente dañinos, 5) riesgo, es la probabilidad de que se produzcan daños originados por una amenaza (CENAPRED, 2006).



Peligros Geológicos

Los peligros geológicos se refieren a fenómenos naturales relacionados con la dinámica de la Tierra que causan daños a la vida humana, infraestructura y el medio ambiente. Estos peligros incluyen, deslizamientos de tierra, terremotos, erupciones volcánicas, avalanchas, hundimientos y otros movimientos de masa (Blaikie *et al.*, 1994). La susceptibilidad a estos fenómenos está influenciada por una combinación de factores naturales y humanos. Entre los factores naturales se encuentran la topografía, geomorfología, litología y las condiciones climáticas (Glade, 2005). Por otro lado, los factores humanos como la urbanización, la antropización, el cambio en el uso y cobertura del suelo, y el cambio climático, incrementan la exposición y vulnerabilidad de las comunidades a estos peligros (Fuchs *et al.*, 2005).

Los procesos geológicos normalmente ocurren con una intensidad que no suele generar problemas significativos. Sin embargo, estos procesos pueden manifestarse con una gran magnitud, dando lugar a desastres graves. En esta categoría se encuentran las amenazas relacionadas con la probabilidad de eventos naturales que provocan la degradación de la capa superficial de la tierra, como la erosión del suelo, fenómenos de remoción en masa, como los derrumbes y escurrimientos del suelo de diferente magnitud e impacto que pueden constituir riesgos (Vargas, 2020). Los fenómenos geológicos más destructivos son los terremotos, las erupciones volcánicas y los deslizamientos de tierra. Estas amenazas geológicas se distinguen por su inicio repentino, gran alcance geográfico y una capacidad destructiva significativa (Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente, 1991).



Movimientos de Laderas

Según Herrera (2022), un deslizamiento se produce cuando rocas o materiales poco consolidados se desplazan pendiente abajo a lo largo de superficies planas o cóncavas conocidas como superficies de deslizamiento. Los deslizamientos, como todo proceso de remoción de masa involucran movimientos de terreno de manera abrupta y descontrolada hacia abajo generalmente impulsado por la gravedad y pueden ser desencadenados por causas naturales o actividades humanas.

La inestabilidad de laderas ocurre cuando existe un desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. En este desequilibrio, las fuerzas que provocan la desestabilización superan las fuerzas que proporcionan la estabilidad o resistencia. Los fenómenos como la erosión, disolución, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas y precipitaciones pueden producir deslizamientos y desprendimientos en las laderas. Estos movimientos del terreno son el reflejo del carácter dinámico del medio geológico y de la evolución natural del relieve, pero también pueden ser provocados o desencadenados por el hombre al interferir con la naturaleza y modificar sus condiciones (Murck, *et al.*, 1996).

De acuerdo con Vallejo *et al.* (2002), las áreas que presentan una mayor propensión a la inestabilidad de laderas incluyen regiones montañosas y escarpadas, áreas con procesos erosivos y de meteorización intensos, laderas en valles fluviales, acantilados, zonas con materiales sueltos y blandos, áreas ubicadas en zonas sísmicas y regiones con alta precipitación, entre otros.



Clasificación de Deslizamientos

Los deslizamientos de ladera dependen de los criterios usados para su diferenciación. La clasificación más usada es la propuesta por Varnes (1978) y se basa en el mecanismo de rotura y propagación del movimiento utilizando criterios morfológicos. Se diferencian cuatro tipos básicos:

Deslizamiento. Ocurre a lo largo de una o varias superficies de rotura bien definidas. La masa de suelo o roca se desplaza en conjunto, actuando como una unidad y experimentando una deformación interna durante su desplazamiento. La velocidad del deslizamiento puede variar y generalmente involucra volúmenes grandes, aunque esto no siempre sea el caso (Varnes, 1978).

Coladas o flujos. Son masas de material sin cohesión que fluyen como un fluido viscoso al sobrepasar su límite líquido, son fenómenos estacionales, es decir, frecuentes en temporadas de lluvias. Los más comunes son los movimientos de suelo, movimientos de derrubios o bloques. Este tipo de movimiento tiene lugar en laderas cubiertas principalmente por material no consolidado y el agua es el motor principal en el proceso. Son movimientos muy rápidos y frecuentemente están relacionados con tormentas (Varnes, 1978).

Desprendimiento. Este tipo de movimiento presenta un desprendimiento brusco y una caída libre a gran velocidad de un bloque o masa rocosa. Se caracterizan por ser fenómenos repentinos que rara vez presentan signos precursores o anunciadores, lo que los hace más difícil de identificar, son desencadenados por factores detonantes como sismos, la actividad humana, vibraciones de maquinaria pesada, explosiones, entre otros. Se originan



principalmente en zonas de acantilados rocosas o laderas con un alto grado de inclinación (Varnes, 1978).

Deslizamientos compuestos. Son aquellos que resultan de la combinación de dos o más mecanismos de movilización de los materiales en diferentes lugares de la masa en movimiento. Estos movimientos alcanzan generalmente un gran tamaño, afectando a laderas completas.

Factores Condicionantes y Desencadenantes del Deslizamiento de Laderas

Existen diversas condiciones que intervienen en los procesos de inestabilidad de laderas y son relativos a la propia naturaleza o características del terreno, entre los agentes detonantes más importantes se tienen aquellos que son de origen antrópico de los cuales se puede evitar su influencia.

Factores Condicionantes

Geológicos. Las características geológicas de una zona, es decir su litología, clases de rocas y suelos, topografía, orientación de fallas y fracturas, actividad sísmica, erosión (Ayala, 2003).

Hidrológicos e hidrogeológicos. El agua es un factor importante en la estabilidad de las pendientes, las características hidrogeológicas que se consideran son los cambios en las presiones de poros o hidrostáticas y el comportamiento geomecánico.

Geomorfológicos. El grado de influencia de los factores geomorfológicos se presenta por la suma de factores litológicos que involucra la dureza o resistencia de las rocas o suelos, el relieve del terreno, pendientes, topografía irregular (Ayala, 2003).



Climáticos. Las condiciones climáticas también pueden favorecer la inestabilidad con lluvias prolongadas, sequías, precipitaciones extremas en un corto período.

Factores Desencadenantes

Naturales. Precipitaciones pluviales normales y extraordinarias, filtración del agua pluvial, condiciones naturales del terreno y sismos son aquellos factores naturales que actúan como detonantes para que se produzcan los deslizamientos de laderas.

Actividades humanas. Son las acciones realizadas por el hombre con fines de desarrollo, algunos ejemplos de estos factores son la deforestación, construcción de infraestructura, asentamientos humanos, prácticas agrícolas y ganaderas, todo esto dentro de los cambios de cobertura/uso de suelo.

La combinación de los factores mencionados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinéticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o de roca. La posibilidad de rotura y los mecanismos y modelos de inestabilidad de laderas están controlados principalmente por factores geológicos y geotécnicos. Los factores geológicos e hidrogeológicos se consideran factores condicionantes y son intrínsecos a los materiales naturales. En los suelos, la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud (Vallejo *et al.*, 2002).

Gestión Integral del Riesgo de Desastre

La Gestión Integral del Riesgo de Desastres Naturales (GIRD) es una estrategia completa y multidisciplinaria. El objetivo de la GIRD es reducir la



vulnerabilidad de las comunidades y mejorar su capacidad de reacción ante eventos naturales desfavorables (Birkmann *et al.*, 2013). Esta estrategia incluye diversas actividades interrelacionadas, como la identificación y evaluación de riesgos, la prevención y mitigación, la preparación, la respuesta y la recuperación posterior al desastre. La GIRD no solo se enfoca en la respuesta inmediata a los desastres, sino que también enfatiza la planificación a largo plazo, la gestión del conocimiento y la información a través de la investigación, el monitoreo y los sistemas de alerta temprana (Kreibich *et al.*, 2017).

La GIRD se define como un proceso que busca reducir la vulnerabilidad y aumentar la resistencia de las comunidades y del medio ambiente ante desastres naturales (Sandoval *et al.*, 2023). De acuerdo con definiciones internacionales la GIRD se refiere a la implementación de políticas y estrategias destinadas a prevenir nuevos riesgos, disminuir los riesgos existentes y gestionar los riesgos residuales, con el fin de fortalecer y reducir las pérdidas ocasionadas por desastres (UNDRR, 2022).

La primera etapa de la GIRD es la identificación y evaluación de riesgos, implica el análisis de peligros naturales, la evaluación de la vulnerabilidades y capacidades de respuesta (Potter *et al.*, 2015). De acuerdo con Alexander (2013), la identificación de riesgos es fundamental para entender la naturaleza y magnitud de los peligros, este proceso incluye la recopilación de datos históricos, la utilización de sistemas de información geográfica (SIG) y modelación de escenarios de riesgo. Reichenbach *et al.* (2005), en un estudio que realizó en la región montañosa de los Andes utilizaron SIG para mapear áreas propensas a deslizamientos de tierra, combinando datos topográficos, geológicos y climáticos,



permitiéndole a los planificadores identificar áreas de alto riesgo y priorizar intervenciones de mitigación.

La prevención y mitigación son partes esenciales de la GIRD que buscan reducir la probabilidad y el impacto de los de los desastres naturales. En esta etapa se incluyen medidas estructurales y no estructurales, como la reforestación (Sassa *et al.*, 2014). En cuanto a la preparación, la respuesta y recuperación involucran el desarrollo de planes de emergencia y capacitación para la preparación y conocimiento ante riesgos (Busayo *et al.*, 2020). La Gestión Integral del Riesgo de Desastres Naturales es esencial para reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de las comunidades y el medio ambiente ante desastres naturales (Calvello *et al.*, 2015).

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Desde su primera implementación en 1978 por Newman y otros científicos para cartografiar zonas susceptibles a deslizamientos, los SIG ha evolucionado significativamente y se han convertido en una herramienta esencial para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos de laderas ya que requiere el manejo simultaneo de una gran cantidad de información, el empleo de los SIG resulta de gran utilidad para alcanzar el objetivo deseado (Zhao *et al.*, 2018). Los SIG integran y analizan información geográfica para visualizar los datos obtenidos en un mapa o cartografía. Procesan la información es a través de capas de atributos o coberturas de datos, que se superponen unas a otras según la información requerida, a esta acción se le denomina geoprocésamiento (Lillesand *et al.*, 2015). En la actualidad, los SIG son una herramienta muy utilizada en una gran variedad de aplicaciones, debido a que permiten realizar



análisis, elaborar cartografía sobre cualquier aspecto ambiental y socioeconómico de la superficie terrestre.

Importancia de los SIG en la Evaluación de Deslizamientos de Laderas

La implementación de los Sistemas de Información Geografía (SIG) se ha convertido en una herramienta para la evaluación y gestión de riesgos asociados a deslizamientos de laderas (Mondini *et al.*, 2021). Dado que el análisis de susceptibilidad a deslizamientos requiere del manejo simultáneo de una gran cantidad de información, el empleo de los SIG permite la integración y análisis de datos espaciales y no espaciales, facilitando la identificación de áreas vulnerables y la toma de decisiones informadas (Guzzetti *et al.*, 2012).

Los deslizamientos de laderas son procesos geológicos que implican el movimiento de suelo y roca cuesta abajo debido a la gravedad. La identificación y evaluación de zonas susceptibles a deslizamientos es crucial para la mitigación de riesgos y la planificación del uso de suelo (Westen *et al.*, 2008). Estos sistemas permiten la integración de diversas capas de información, como la topografía, geología, uso de suelo y vegetación, datos climáticos, entre otros, lo que facilita una evaluación multicriterio de la susceptibilidad a deslizamientos (Westen *et al.*, 2008; Guzzetti *et al.*, 2012). Además, los SIG permiten la modelación espacial y la simulación de escenarios, lo que es fundamental para la planificación y la gestión del riesgo (Carrara *et al.*, 2013).

Aplicación de los SIG en la Evaluación de Deslizamientos de Laderas

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han revolucionado la manera en que se aborda la evaluación de riesgos naturales, en combinación con técnicas de percepción remota y evaluación multicriterio, esto se presenta como



una herramienta para identificar y cartografiar zonas susceptibles a deslizamientos de laderas y de esta manera tener una mejor planificación y gestión del territorio (Akgun, 2012). Desde 2012, estudios han demostrado la eficacia de los SIG en la evaluación de deslizamientos de laderas en diversas regiones del mundo. Por ejemplo, en un estudio realizado en la región de Wenchuan, China, después del terremoto de 2008, se utilizó SIG para integrar datos de pendiente, geología, uso del suelo y precipitación, lo que permitió la identificación de áreas de alta susceptibilidad a deslizamientos (Xu *et al.*, 2012). De manera similar en la región de Darjeeling, India, se emplearon SIG y técnicas de evaluación multicriterio para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, lo que resultó en la identificación de zonas críticas y la implementación de medidas de mitigación (Lee *et al.*, 2013).

El análisis de la susceptibilidad a deslizamientos de laderas es una aplicación clave de los SIG en la gestión de riesgos naturales. Utilizando geoprocesos y técnicas de modelado espacial, es posible generar mapas de susceptibilidad que identifiquen áreas con probabilidad de deslizamientos. Estos mapas se basan en la combinación de múltiples factores de riesgo, ponderándolos según su influencia relativa en la ocurrencia de deslizamientos (Van Western *et al.*, 2013).

Evaluación Multicriterio (EMC)

La evaluación multicriterio (EMC) tiene sus raíces en la teoría de la decisión y la investigación operativa. Inicialmente, estas técnicas se aplicaban principalmente en contextos militares y económicos, pero con el tiempo su



aplicación se ha expandido a una variedad de campos, incluyendo la gestión de recursos naturales y la planificación territorial (Keeney *et al.*, 1993).

La EMC se basa en la premisa de que las decisiones complejas pueden ser descompuestas en una serie de criterios, que pueden ser evaluados y ponderados para llegar a una decisión final. Según Belton y Stewart (2002), la EMC es un proceso que permite a los tomadores de decisiones evaluar y comparar diferentes alternativas en función de múltiples criterios. Este proceso generalmente implica la identificación de los criterios relevantes, la asignación de pesos a estos criterios, la evaluación de las alternativas en función de cada criterio para llegar a una decisión fina (Saaty, 2016).

Principios de la Evaluación Multicriterio (EMC)

La EMC se basa en varios principios que guían su aplicación, estos principios incluyen la identificación de criterios relevantes, la asignación de pesos a estos criterios para obtener una decisión final. El primer paso en cualquier análisis multicriterio es la identificación de los criterios relevantes que influirán en la decisión (Ayalew *et al.*, 2005). Una vez identificados los criterios, es necesario asignarles pesos que reflejen su importancia relativa. Este proceso puede ser subjetivo y a menudo se basa en la experiencia y el juicio de expertos. Finalmente, los criterios ponderados se agregan para obtener una evaluación global. Existen diversas técnicas para obtener la decisión final, incluyen métodos de suma ponderada, análisis de utilidad multiatributo y técnicas de programación matemática (Belton *et al.*, 2002).



Metodologías de Ponderación

La evaluación multicriterio es un conjunto de técnicas utilizadas en la decisión multidimensional y los modelos de evaluación dentro del campo de la toma de decisiones. Existen diversas metodologías para llevar a cabo una EMC, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Algunas de las metodologías más comunes incluyen:

El Analytic Hierarchy Process (AHP) es una metodología de toma de decisiones multicriterio para la asignación de pesos o importancias desarrollada por Thomas L. Saaty en la década de 1970. Este método se basa en la descomposición de un problema complejo en una jerarquía de criterios y subcriterios, permitiendo a los decisores realizar comparaciones por pares entre elementos. Una de las principales ventajas de AHP es su capacidad para manejar tanto criterios cualitativos como cuantitativos, facilitando una evaluación integral (Saaty, 1980). Además, el AHP permite la verificación de la consistencia en las decisiones, lo que mejora la fiabilidad de los resultados. Sin embargo, una desventaja es que el proceso de comparación por pares puede ser subjetivo, especialmente en problemas con un gran número de criterios. A pesar de esta limitación, el AHP ha sido ampliamente utilizado en diversas áreas, incluyendo la gestión de riesgos naturales (Saaty, 2008).

El método de preferencia de ordenación de alternativas (ranking) fue desarrollado por Brans y Vincke (1985), utiliza funciones de preferencia para comparar en función de su desempeño en relación con varios criterios. Este método de ponderación es útil cuando se requiere una evaluación rápida y no se dispone de información detallada sobre los criterios (Hwan *et al.*, 1981). Una de



las ventajas de Ranking es su simplicidad y facilidad de implementación, sin embargo, una desventaja es que no considera la magnitud de las diferencias entre criterios, lo que puede llevar a decisiones subóptimas. Además, el Ranking puede ser subjetivo y depende en gran medida de la percepción del evaluador, lo que puede generar sesgos y afectar la consistencia de los resultados.

El método de rating, también conocido como de puntuación o calificación, implica asignar una puntuación. Este método permite una evaluación más detallada que en el Ranking. Una de las ventajas de Ranking es su flexibilidad, ya que permite la incorporación de diferentes escalas de medición y ponderación de criterios según su importancia relativa. Sin embargo, una desventaja es que la asignación de puntuaciones puede ser subjetiva y susceptible a sesgos, lo que puede afectar la validez de los resultados (Belton *et al.*, 2002).

El método de pesos iguales es una técnica de EMC en la cual todos los criterios se consideran igualmente importantes, asignándoles el mismo peso en el proceso de decisión. Este enfoque es particularmente útil cuando no se dispone de información suficiente para determinar la importancia relativa de los criterios o cuando se busca una solución rápida y sencilla. Una desventaja significativa es que puede no reflejar adecuadamente las prioridades y preferencias de los decisores.

Una de las metodologías emergentes es el uso de Inteligencia Artificial (IA) para asignar pesos o importancias en la evaluación multicriterio que aprovecha técnicas avanzadas como el aprendizaje automático y los algoritmos evolutivos. Estas técnicas permiten la identificación de patrones y la optimización de pesos en función de grandes volúmenes de datos y múltiples criterios (Zhang *et al.*,



2020). Una de las principales ventajas de esta técnica es su capacidad para manejar problemas complejos y dinámicos, proporcionando soluciones más precisas y adaptativas (Chen *et al.*, 2019).

Aplicaciones de la Evaluación Multicriterio en la Gestión de Riesgos Naturales

La EMC es una herramienta analítica que se utiliza para abordar problemas complejos de toma de decisiones, especialmente en contextos donde múltiples criterios deben ser considerados simultáneamente. En la gestión de riesgos naturales, la EMC es útil debido a la naturaleza multifacética de los riesgos y las diversas dimensiones que deben ser evaluadas, tales como la vulnerabilidad, la exposición y la capacidad de respuesta (Greiving *et al.*, 2015). Esta herramienta se ha utilizado para evaluar la vulnerabilidad y la exposición de diferentes regiones a riesgos naturales como terremotos, inundaciones y deslizamientos de tierra. Por ejemplo, un estudio realizado por Kappes *et al.* (2012) utilizó la EMC para evaluar la vulnerabilidad de diferentes comunidades en los Alpes europeos a múltiples riesgos naturales. El estudio integro datos sobre la exposición física, la vulnerabilidad social y la capacidad de respuesta para proporcionar una evaluación del riesgo.

En los casos de deslizamientos de tierra, la EMC integra datos de diversas fuentes y tipos, proporcionando una evaluación más completa y precisa de las áreas susceptibles. La EMC permite identificar y mapear zonas de riesgo, esto es útil para regiones montañosas, donde la topografía y la geología varían considerablemente (Guzzetti *et al.*, 2005). La información obtenida a través de esta herramienta puede ser utilizada para la planificación y mitigación de riesgos.



Por ejemplo, ayuda a determinar áreas donde se deben implementar medidas de estabilización del terreno o donde evitar nuevas construcciones. Proporciona una base para la toma de decisiones informadas, permitiendo a los responsables de la gestión de riesgos evaluar diferentes escenarios (Marin *et al.*, 2017).

Integración de SIG en la Evaluación Multicriterio

La integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Percepción Remota (PR) en la Evaluación Multicriterio (EMC) ha emergido como una metodología robusta y eficaz para abordar problemas complejos en diversas disciplinas, incluyendo la gestión de recursos naturales, la planificación urbana y la evaluación de riesgos naturales (Zhang *et al.*, 2020).

Los SIG son herramientas que permiten la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos geoespaciales. Estas capacidades son cruciales para la EMC, ya que permiten manejar grandes volúmenes de datos y realizar análisis espaciales complejos. Los SIG facilitan la integración de datos de diferentes fuentes y la aplicación de técnicas de análisis espacial en la EMC (Longley *et al.*, 2019). La percepción remota (PR) por otro lado, implica la obtención de información sobre objetos o áreas desde una distancia, utilizando imágenes de satélites, esta tecnología permite la recopilación de datos en áreas inaccesibles o peligrosas, proporcionando una visión de la superficie terrestre (Jensen, 2020). Por ejemplo, en la planificación del uso del suelo, la integración de SIG y PR permite la evaluación de la idoneidad del suelo para diferentes usos, considerando factores como la topografía, la vegetación y la accesibilidad. Esta información es esencial para la planificación urbana y rural (Zhang *et al.*, 2020).



Tablas de Contingencia de Cruce de Información

Las tablas de contingencia son una herramienta estadística utilizada para analizar la relación entre las clases de susceptibilidad generadas por diferentes modelos y la distribución espacial de los elementos territoriales. Este análisis permite evaluar la consistencia y utilidad práctica de los modelos al identificar tendencias y discrepancias en los niveles de susceptibilidad asignados a áreas específicas (Lee & Pradhan, 2007).

La evaluación de susceptibilidad territorial es una herramienta para identificar áreas en riesgo ante fenómenos naturales como son los deslizamientos. Diversas metodologías han sido empleadas, desde herramientas de ponderación de pesos hasta la integración de elementos físicos de territorio en los modelos de susceptibilidad. Un aspecto crucial en la implementación de estas metodologías es la integración de datos espaciales representativos de los elementos físicos del territorio. Estos elementos, como caminos, localidades rurales, vías férreas, lotes mineros y sitios turísticos, actúan como variables que permiten establecer patrones de susceptibilidad en diferentes niveles, desde "Muy Baja" hasta "Muy Alta". Estudios previos han demostrado que estos elementos territoriales no solo son indicadores de vulnerabilidad, sino que también proporcionan criterios para la toma de decisiones en la gestión de riesgos (Tien *et al.*, 2019; Merghadi *et al.*, 2020).



MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

Localización. El área de estudio se encuentra en las ecorregiones de las sierras templadas y selvas cálido-secas (Figura 1), con una superficie aproximada de 73,635 km² ubicadas en la región montañosa del estado de Chihuahua, en los municipios de Janos, Casas Grandes, Ignacio Zaragoza, Madera, Gómez Farias, Temósachic, Guerrero, Moris, Ocampo, Bocoyna, Chínipas, Guazapares, Urique, Guachochi, Batopilas, Morelos, Guadalupe y Calvo.

Fisiografía. Las ecorregiones pertenecen a la Sierra Madre Occidental que es una extensa cadena montañosa que se extiende a lo largo de varios estados. Su orografía se caracteriza principalmente por sus montañas que alcanzan altitudes significativas, con picos que superan los 3,000 msnm. Presenta una topografía accidentada y montañosa, con una serie de crestas, valles profundos, cañones y barrancas. En gran parte es escarpada con pendientes pronunciadas y terrenos irregulares (CONABIO, 2013).

Usos de suelo y vegetación. Se caracteriza por estar compuesta principalmente por bosques templados de encinos y pinos, bosques secos y matorrales, planicies y barrancas, en zonas con menor altitud y climas cálidos, se desarrollan bosques tropicales caducifolios. Con respecto a los usos de suelo, destacan áreas agrícolas donde se cultiva una variedad de cultivos como maíz, frijol, trigo, frutas y hortalizas. Estas áreas agrícolas a menudo están asociadas con la presencia de ríos y corrientes (CONABIO, 2013).

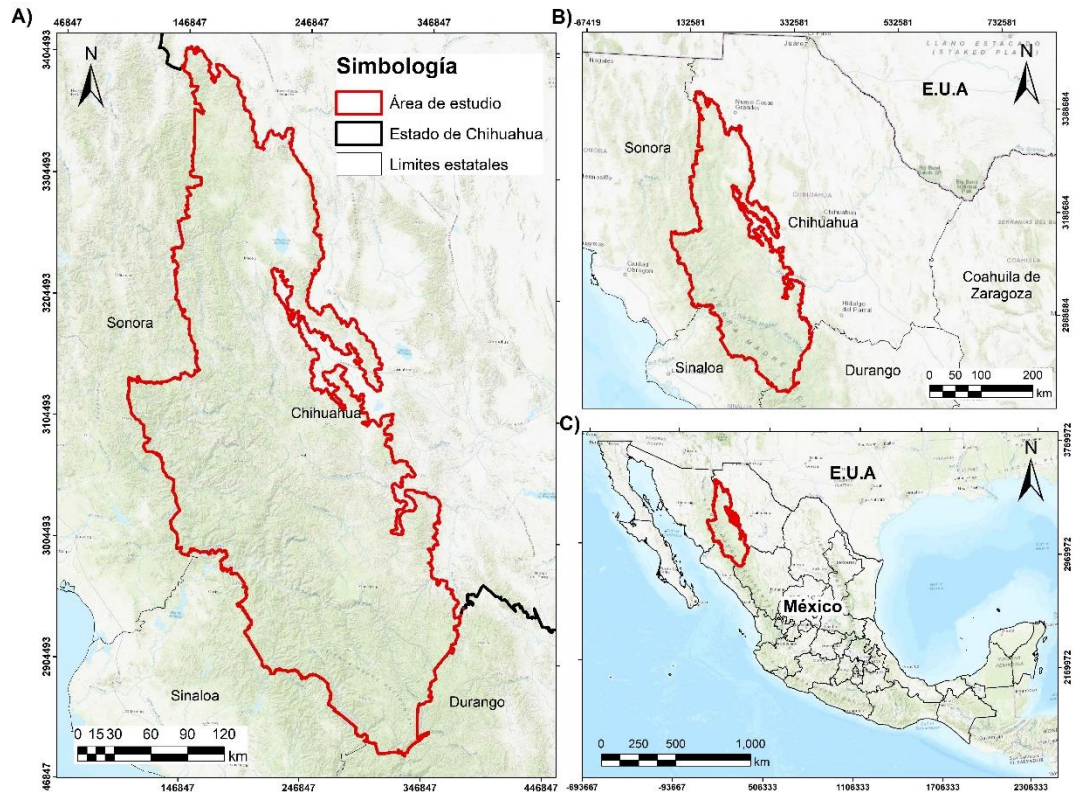


Figura 1. Localización del área de estudio. (a) área de estudio, (b) Estado de Chihuahua, México (c).



Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica (EMC-SIG)

La Evaluación Multicriterio en combinación con Sistemas de Información Geográfica (EMC-SIG) fue la metodología empleada para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en la Sierra Madre Occidental. Esta metodología integró datos espaciales y un análisis de criterios para identificar áreas susceptibles, utilizando SIG para manejar y procesar información con contexto geoespacial. El proceso general incluyó la identificación, selección y ponderación de los criterios que influyen en la susceptibilidad a deslizamientos, como lo son la topografía, la geología, cobertura de uso de suelo, proximidad a cuerpos de agua y vías de comunicación, entre otros. La integración de la Evaluación Multicriterio con los Sistemas de Información Geográfica (EMC-SIG) permitió la visualización y el análisis espacial de los datos, lo que facilitó la identificación de áreas con susceptibilidad al deslizamiento.

El procedimiento de EMC-SIG se llevó a cabo mediante los siguientes pasos:

Selección de Criterios

El análisis comenzó con la recopilación de datos para la selección de los criterios, se identificaron los criterios relevantes para la evaluar la susceptibilidad, estos criterios están relacionados directamente con el objetivo del estudio que incluyen características topográficas, biofísicas o de proximidad (Cuadro 1). La selección de criterios fue proceso que requirió de la revisión de literatura.

Estandarización de Criterios

Estos datos se integraron en un entorno de SIG para su procesamiento y análisis. Se analizaron capas de información de varias fuentes, edafología, la



Cuadro 1. Criterios seleccionados para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de laderas.

Criterio	Descripción
Topográficas	
Sistema de topoformas	Forma y morfología del terreno, como la pendiente, la altitud y la forma de las montañas, valles y mesetas.
Geomorfología	La estructura y la forma del paisaje, como terrazas, laderas escarpadas y depresiones que pueden influir en la estabilidad del terreno
Pendiente del terreno	Grado de inclinación de la superficie del terreno.
Biofísicas	
Uso de suelo y vegetación	Categorías de uso de suelo y cobertura vegetal en la zona de estudio.
Clima	Patrones climáticos, como la temperatura que pueden afectar la estabilidad de laderas.
Precipitación media anual	Cantidad de precipitación media anual del periodo 2000-2020
Geología	Tipos de roca, fallas activas y estructuras geológicas que influyen en la estabilidad.
Incendios forestales	Extensión de incendios forestales en la zona, que afectan la cobertura vegetal y la estabilidad del suelo.
Densidad de vegetación forestal	Cantidad de vegetación forestal en la zona, que contribuye a la estabilidad del terreno al reducir la erosión.
Edafología	Características del suelo, como textura y composición, que afectan la estabilidad.
Proximidad	
Hidrología	Distribución de cuerpos de agua, como ríos y arroyos que pueden afectar la estabilidad de laderas.
Localidades urbanas	Distancia a áreas urbanas potencialmente afectadas por deslizamientos.
Localidades rurales	Distancia a zonas rurales expuestas a riesgos de deslizamiento.



Caminos principales

Distancia a carreteras principales

Caminos
secundarios

Distancia a caminos secundarios

Vías férreas

Ubicación de líneas ferroviarias

Fallas y fracturas

Identificación y ubicación de fallas geológicas y
fracturas en el área.

Magnitud del sismo

Actividad sísmica de la región.



densidad forestal, condiciones climáticas, para comprender como estos criterios influyen en la susceptibilidad. Cada capa de información fue procesada en el entorno SIG (ArcGIS 10.5), asignando un valor de 1 a 5 de acuerdo con su nivel de susceptibilidad al deslizamiento de laderas. Por ejemplo, áreas con pendientes pronunciadas recibieron valores más altos, ya que son más propensas a deslizamientos, mientras que pendientes menos pronunciadas recibieron valores bajos (Cuadro 2). Este procedimiento se aplicó para los 18 criterios identificados, estandarizarlos permitió integrar diferentes capas en los modelos de evaluación multicriterio ya que se combinan y comparan entre sí. Además, se realizó una homogeneización de las capas de información, convirtiéndolas en formato ráster, conservando un mismo tamaño de celda. La escala de los criterios, en relación con el tamaño de píxel, corresponde a 1:50,000, de acuerdo con lo mencionado por Tobler (1987), todos los datos proporcionados se transformaron con una proyección cartográfica común (UTM 13N) con datum WGS84.

Ponderación de Criterios

Para determinar la importancia relativa de cada criterio en la evaluación multicriterio de susceptibilidad a deslizamientos, se asignaron pesos utilizando cinco distintas metodologías: AHP (Proceso Analítico Jerárquico), AHP-IA (AHP asistido por Inteligencia Artificial), ranking, rating y ponderación equitativa. La ponderación de los pesos relativos se fundamenta en la identificación y priorización de los criterios relevantes, de acuerdo con Saaty (2019), en su trabajo sobre el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), la estructuración jerárquica de los criterios es el paso inicial. La elección del método



Cuadro 2. Estandarización de los criterios seleccionados que influyen en la susceptibilidad a deslizamiento de laderas.

NS	Sismos	Distancia a Fallas y Fracturas (m)	Pendiente del terreno (°)
1	2.70 - 3.45	11800->	0-15
2	3.45 - 3.66	7500-11800	15-25
3	3.66 - 3.83	4500-7500	25-35
4	3.83 - 3.95	1900-4500	35-45
5	4.0->	0-1900	45->
NS	Distancia a vías férreas (m)	Distancia a caminos secundarios (m)	Distancia a caminos principales
1	238,823.43->	7000->	72,450.15->
2	106,768.12 - 158,279.062	4000-7000	28,980.06 - 43,754.21
3	65,559.37 - 106,768.12	2000-4000	17,899.45 - 28,980.06
4	30,906.56 - 65,559.37	1000-2000	8,239.42 - 17,899.45
5	0 - 30,906.56	0-1000	0 - 8,239.42
NS	Distancia a ríos (m)	Distancia a localidades rurales (m)	Distancia a localidades urbanas (m)
1	3000->	15,287.66->	47,566.48->
2	2000-3000	4,136.66 - 6,594.67	15,295.89 - 23,689.97
3	1300-2000	2,458.01 - 4,136.66	9,513.29 - 15,295.89
4	600-1300	1,258.98 - 2,458.01	4,849.91 - 9,513.29
5	0-600	0 - 1,258.98	0 - 4,849.91
NS	Uso de suelo y vegetación	Precipitación media anual	Temperatura media anual (°C)
1	Bosque cultivado, bosque de ayarín, bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de táscate	0.033->	13.82 – 15.03
2	Pastizal halófito, pastizal inducido, pastizal cultivado, pastizal natural, vegetación secundaria arbórea de bosque de ayarín, vegetación secundaria arbórea de bosque de encino, vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino, vegetación secundaria arbórea de bosque de pino, vegetación secundaria arbórea de bosque pino-encino, vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino, vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural, vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, vegetación secundaria herbácea de	0.033 - 0.093	



	bosque de pino, vegetación secundaria herbácea de bosque de táscate.		
3	Bosque de galería, matorral subtropical, vegetación de galería. Agricultura de humedad anual, agricultura de riego anual, agricultura de riego anual y permanente, agricultura de riego anual y	0.093 - 0.200	13.21 – 13.82 15.03 – 17.40
4	semipermanente, agricultura de riego permanente, agricultura de temporal anual, agricultura de temporal anual y permanente, agricultura de temporal permanente.	0.200 - 0.392	
5	Asentamientos humanos, cuerpos de agua, desprovisto de vegetación, sin vegetación aparente.	0.392 - 0.738	12.00 – 13.21 17.40 – 22.05
NS	Sistema de topoformas	Litología	Edafología
1	Valle intermontano, valle intermontano con lomerío	Cuarzodiorita, diorita, skarn-hornfels	Durisol, vertisol
2	Bajada con lomerío, llanura aluvial con lomerío, llanura aluvial inundable, valle abierto de montaña, valle abierto de montaña con mesetas, valle de laderas tendidas con lomerío	Andesita, andesita-arenisca, andesita-basalto, andesita-toba andesítica, andesita-taquita, arenisca-conglomerado poligénico, arenisca-toba riolítica, basalto, basalto-andesita, basalto-toba riolítica, esquisto-metasedimentario, gneis, granito, granito-granodiorita, granodiorita, granodiorita-diorita, ignimbrita-toba riolítica, lacustre, metavolcano-sedimentario, pórfido andesítico, pórfido monzonítico, pórfido riolítico, pórfido traquítico, riolita, riolita-toba riolítica, volcanosedimentaria Brecha sedimentaria poligénica, brecha volcánica andesítica, brecha volcánica basáltica-basalto, brecha volcánica riolítica, caliza, caliza-arenisca, caliza-dolomía, caliza-lutita, conglomerado poligénico, conglomerado poligénico-arenisca, conglomerado poligénico-basalto, conglomerado poligénico-toba riolítica, dolomía-arenisca, toba riolítica, toba riolítica-basalto, toba riolítica-ignimbrita, toba riolítica-riolita, traquita	Calcisol, cambisol, planosol
3	Llanura aluvial de piso rocoso, sierra escarpada	conglomerado poligénico-arenisca, conglomerado poligénico-basalto, conglomerado poligénico-toba riolítica, dolomía-arenisca, toba riolítica, toba riolítica-basalto, toba riolítica-ignimbrita, toba riolítica-riolita, traquita	Phaeozem, umbrisol
4	Bajada típica, sierra alta, sierra plegada	Aluvial, lutita-arenisca	Leptosol
5	Llanura aluvial con lomeríos, lomerío con mesetas, lomerío escarpado,	Coluvial, lahar	Fluvisol, luvisol, regosol



lomerío típico, meseta con cañadas,
sierra alta con lomerío.

NS	Distancia a incendios (m)	Densidad forestal (no. Individuos / km²)	Geomorfología del terreno
1	0 - 8,329.35	2.35 ->	Cañones, arroyos profundamente encajados, drenajes de media pendiente, valles poco profundos
2	8,329.35 - 16,381.07	0.91 - 1.32	Drenajes en tierras altas, cabeceras de ríos, valles en forma de U.
3	16,381.07 - 27,209.23	0.57 - 0.91	Llanuras pequeñas, pendientes abiertas o planas
4	27,209.23 - 42,202.08	0.23 - 0.57	Pendientes superiores, mesetas, crestas/colinas locales en valles
5	42,202.08 - 70,799.54	0 - 0.23	Crestas de media pendiente, pequeñas colinas en llanuras, cumbres de montañas, crestas altas

NS=Nivel de susceptibilidad



ponderación puede influir en los resultados y conclusiones del estudio. Por lo tanto, comparar métodos de ponderación es esencial para garantizar la robustez y validez de los resultados.

Métodos de Ponderación Utilizados

Método de ponderación ranking: Este método es uno de los enfoques más simples y directos para la ponderación de criterios. Consistió en ordenar los criterios de acuerdo con su importancia relativa, asignando un rango a cada uno. Luego estos rangos se utilizaron para calcular los pesos correspondientes a cada criterio (Cuadro 3). Con Método de Ranking se buscó simplificar la asignación de pesos permitiendo una comparación directa entre los criterios en función de su importancia percibida (Ayalew *et al.*, 2004).

Pasos del método de ranking

- 1) Orden de criterios: los criterios se ordenaron en función de su importancia relativa, utilizando el juicio de expertos o basándose en análisis previos.
- 2) Asignación de rangos: a cada criterio se le asigno un rango numérico (el criterio más importante recibe el rango de 10, el menos importante recibe el rango de 1).
- 3) Cálculo de pesos: los pesos se calcularon convirtiendo los rangos en valores proporcionales, asegurando que la suma de todos los pesos sea igual a 1 (Ecuación 1).

$$Peso_i = \frac{n - r_i + 1}{\sum_{j=1}^n (n - r_j + 1)} \quad (1)$$



Donde n es el número total de criterios y r_i es el rango del criterio i .

- 1) Normalización de los pesos: Se convirtieron los rangos asignados a cada criterio en pesos normalizados que suman 1. Esto asegura que los pesos reflejen proporcionalmente la importancia relativa de los criterios.

El método de ranking destaca por su simplicidad y facilidad de aplicación, es una opción que permite una evaluación rápida y efectiva de la relevancia de múltiples criterios. La principal desventaja reside en la subjetividad del proceso de ordenamiento de los criterios, lo cual puede afectar los resultados finales. A pesar de esta desventaja, sigue siendo una herramienta útil en la evaluación multicriterio cuando se combina con otras técnicas más robustas.

Método de rating: Este método de calificación implica asignar calificaciones numéricas a los criterios según su importancia relativa. En este método se asignaron calificaciones numéricas a cada criterio, en una escala predefinida, basadas en su relevancia. Estas calificaciones se normalizaron para convertirlas en pesos que sumen 1. Este método se emplea para situaciones de múltiples criterios donde se requiere una evaluación precisa (Abdi *et al.*, 2021).

Pasos del método de rating:

- 1) Asignación de calificaciones: cada criterio se evaluó y se le asignó una calificación en una escala predefinida basándose en su importancia relativa. Las calificaciones pueden ser asignadas por expertos en la materia o derivados datos y estudios previos.



- 2) Normalización de calificaciones: las calificaciones asignadas a cada criterio se normalizaron para convertirlas en pesos. La normalización asegura que la suma de todos los pesos sea igual a 1 (Ecuación 2).

$$Peso_i = \frac{Calificación_i}{\sum_{j=1}^n Calificación_j} \quad (2)$$

Donde $Calificación_i$ es la calificación del criterio i y $\sum_{j=1}^n Calificación_j$ es la suma de todas las calificaciones asignadas

Proceso de análisis jerárquico (AHP): El AHP es una metodología que permite integrar una variedad de criterios de distinto tipo como geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, climáticos, entre otros. Los criterios se organizan jerárquicamente y se ponderaron según su importancia relativa. El AHP facilitó la comparación pareada de criterios, proporcionando un marco robusto para la toma de decisiones complejas. Al normalizar las comparaciones y verificar la consistencia de los juicios, el AHP asegura que las ponderaciones reflejen de manera precisa la importancia relativa de cada criterio (Saaty, 2008).

Pasos del proceso de análisis jerárquico (AHP):

- 1) Objetivo principal: es la meta general que se pretende alcanzar mediante el análisis. Este objetivo se coloca en el nivel más alto de la jerarquía.
- 2) Criterios: son los factores o elementos que contribuyen a alcanzar el objetivo principal (ej. pendiente del terreno, precipitación, uso de suelo y vegetación, entre otros.)



- 3) Matriz de comparaciones pareadas: esta matriz permite comparar los criterios entre sí en términos de su importancia relativa. El proceso se realizó mediante comparaciones pareadas utilizando una escala de importancia que va de 1 a 9 (Cuadro 3).
- 4) Matriz de comparaciones pareadas: es una matriz cuadrada $n \times n$, donde n es el número de criterios. Cada elemento a_{ij} de la matriz representa la importancia del criterio i en relación con el criterio j .
- 5) Cálculo de pesos relativos: una vez construida la matriz de comparaciones pareadas se calcularon los pesos relativos de cada criterio. Estos pesos reflejan la importancia relativa.
- 6) Cálculo del vector de prioridades: se promediaron los valores de cada fila de la matriz normalizada y se dividieron por el número de criterios para obtener el vector de prioridades (pesos relativos). Asegurando que la suma de los pesos sea igual a 1, si no es así se deben ajustar los pesos.
- 7) Índice de consistencia: para verificar que las comparaciones pareadas sean consistentes, se calculó el índice de Consistencia (CI) (Ecuación 4) y la Razón de Consistencia (CR) (Ecuación 5).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Donde n es el número de criterios, λ_{max} es el valor propio máximo resultado de multiplicar la matriz original por el vector de prioridades, luego dividir cada resultado por el correspondiente peso del vector de prioridades y se promedian los valores.



Cuadro 3. Escala de Saaty valores para asignación de pesos o importancias relativas en la comparación por pares.

Escala de Saaty		Escala recíproca de Saaty	
1	Igual importancia entre ambos elementos	1	Igual importancia entre ambos elementos
3	Débil importancia de un elemento sobre otro	1/3	Débilmente menos importante en un elemento sobre otro
5	Moderada importancia de un elemento sobre otro	1/5	Mucho menos importancia de un elemento sobre otro
7	Fuerte importancia de un elemento sobre otro	1/7	Absolutamente menos importante un elemento sobre otro
9	Importancia absoluta de un elemento sobre otro	1/9	Absolutamente menos importante un elemento sobre otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Valores intermedios



$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

Donde CI es el Índice de Consistencia, RI es el Índice de Consistencia Aleatoria. Si $CR < 0.1$, la consistencia es aceptable, si $CR \geq 0.1$, se debe revisar la matriz de comparaciones (Cuadro 4).

Ponderación equitativa: En la ponderación equitativa de los criterios se asume que todos los pesos son iguales porque este enfoque parte bajo el principio de que cada factor influye de manera equitativa en la susceptibilidad a deslizamientos. Es decir, no se hace distinción sobre cual criterio tiene más o menos influencia en el deslizamiento de laderas. Bajo este enfoque, cada criterio contribuye de manera proporcional e igualitaria al resultado final. Este método es útil cuando no se dispone de información suficiente para justificar la asignación de diferentes pesos a los criterios o cuando se busca una aproximación inicial simple (Keeney *et al.*, 2020).

Pasos del método de ponderación equitativa:

- 1) Identificación de los criterios: Criterios relevantes para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos, basados en factores topográficos, biofísicos y de proximidad.
- 2) Asignación de pesos: se asignaron el mismo peso a cada criterio. Si, por ejemplo, se seleccionaron 18 criterios, cada uno tendrá un peso de $1/18 = 0.056$ de importancia. La fórmula para asignar el peso a cada criterio fue (Ecuación 6):



Cuadro 4. Valores del índice de coherencia aleatoria.

Tamaño de la Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>RI</i>	0.0	0.0	0.6	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5



$$W_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n} \quad (6)$$

Donde W_i el peso del criterio, $n <$ es el número total de criterios seleccionados.

Este enfoque se justifica cuando no se dispone de suficiente información para diferenciar la importancia de los criterios o cuando se realiza un análisis exploratorio sin sesgos en la ponderación (Wang *et al.*, 2020).

Proceso de jerarquía analítica (AHP) asistido por Inteligencia Artificial

(IA): Este método es una extensión del AHP tradicional, combina algoritmos de inteligencia artificial para optimizar la asignación de pesos en el análisis multicriterio. Se realizó la comparación entre los criterios en función de su importancia relativa asistido por IA, entrenándola con datos históricos para aprender la importancia relativa de cada criterio y realizar ajustes necesarios en los pesos (Wang *et al.*, 2021).

Para definir los pesos se utilizó la inteligencia artificial generativa (IAG) Chat Generative Pre-Trained Transformer (ChatGPT) el cual es un chatbot basado en modelos lingüísticos, especialmente GPT-4o. Una vez asignados los pesos asistidos por la IA, se normalizaron para asegurar que la suma de todos los pesos sea igual a 1. Al igual que en AHP tradicional se realizó el cálculo del índice de consistencia (CI) para verificar la relación entre los pesos de los criterios. En el AHP tradicional, este índice se calcularía, pero en el AHP asistido por IA, este paso involucra ajustes automáticos basados



en los algoritmos de la IA para mejorar la coherencia del modelo (Moeinizade *et al.*, 2020).

Cálculo del Índice de Susceptibilidad (LSI)

Es el paso final en la aplicación de la EMC-SIG, donde se combinaron los valores de cada criterio ponderado de cada método de asignación de pesos para obtener un valor total que representa la susceptibilidad a deslizamiento de cada unidad geográfica (Chen *et al.*, 2021). Este índice permitió clasificar las zonas del área de estudio según su nivel de riesgo (Cuadro 5).

Para cada método de asignación de pesos, el índice de susceptibilidad (*LSI*) se calcula como la suma ponderada de los valores normalizados de cada criterio (*C_i*), multiplicados por los pesos correspondientes (*W_i*). La fórmula utilizada fue (Ecuación 7):

$$LSI = \sum_{i=1}^n (C_i \times W_i) \quad (7)$$

Donde *LSI* es el índice de susceptibilidad, *C_i* es el valor estandarizado del criterio *i*, *W_i* es el peso asignado al criterio *i*.

Este proceso asegura que cada criterio influya en el índice de susceptibilidad de acuerdo con su relevancia relativa. Al calcular el *LSI* para cada método de evaluación multicriterio, se obtiene un valor continuo de susceptibilidad que permite clasificar las zonas del área de estudio en distintos niveles de riesgo, tales como “Muy baja”, “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy Alta” (Hong *et al.*, 2019).



Cuadro 5. Clasificación del Índice de Susceptibilidad a deslizamiento (LSI) para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de laderas.

Índice de susceptibilidad	Valor	Descripción
Muy Alto	5	Áreas críticas con alta probabilidad de deslizamiento debido a fuertes pendientes, suelos inestables, baja cobertura vegetal. Estas zonas requieren intervenciones prioritarias para la mitigación de riesgos.
Alto	4	Zonas con alta susceptibilidad donde factores topográficos y geológicos, como pendientes pronunciadas aumenta la probabilidad de deslizamientos bajo condiciones desfavorables
Moderado	3	Sectores con susceptibilidad media, donde existen pendientes moderadas y suelos parcialmente consolidados. Estos sectores tienen riesgo de deslizamientos en eventos extremos, como lluvias intensas o sismos.
Bajo	2	Áreas con baja susceptibilidad debido a pendientes suaves y suelos estables. Aunque el riesgo es limitado, estas zonas pueden ser afectadas marginalmente en eventos muy extremos.
Muy bajo	1	Sectores con mínima susceptibilidad a deslizamientos, caracterizados por terrenos planos, suelos consolidados, y alta cobertura vegetal, que proporcionan estabilidad incluso en condiciones adversas.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección y Estandarización de Criterios

La evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos en la Sierra Madre Occidental se basó en 18 criterios agrupados en tres categorías principales: topográficas, biofísicas y de proximidad. Estos criterios incluyen el grado de inclinación de la pendiente del terreno, el uso de suelo y vegetación, la geología, la densidad forestal, la distancia a cuerpos de agua y carreteras, entre otros. La selección se fundamentó en literatura previa sobre deslizamientos tanto a escala global como regional y consideró las especificidades ambientales y geológicas de la región (Figuras 2-6) (Akgun, 2012).

Asignación de pesos

La metodología incluyó la aplicación de cinco enfoques de ponderación multicriterio: AHP, AHP asistido por inteligencia artificial (AHP-IA), ranking, rating y ponderación equitativa. Estos enfoques mostraron diferencias significativas en la asignación de pesos, destacando la importancia de la pendiente y la geomorfología en AHP y AHP-IA, mientras que los enfoques de ponderación equitativa mostraron una distribución más uniforme de los pesos (Chen *et al.*, 2021).

El Cuadro 6 muestra cómo varían los pesos asignados a cada criterio dependiendo de la metodología utilizada. Por ejemplo, el criterio de pendiente recibió un peso alto en la metodología AHP, lo que refleja su importancia crítica en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos, debido a su influencia directa en la estabilidad del terreno. En contraste, en el método de ponderación equitativa, todos los criterios reciben un peso constante de 5.55, reflejando una

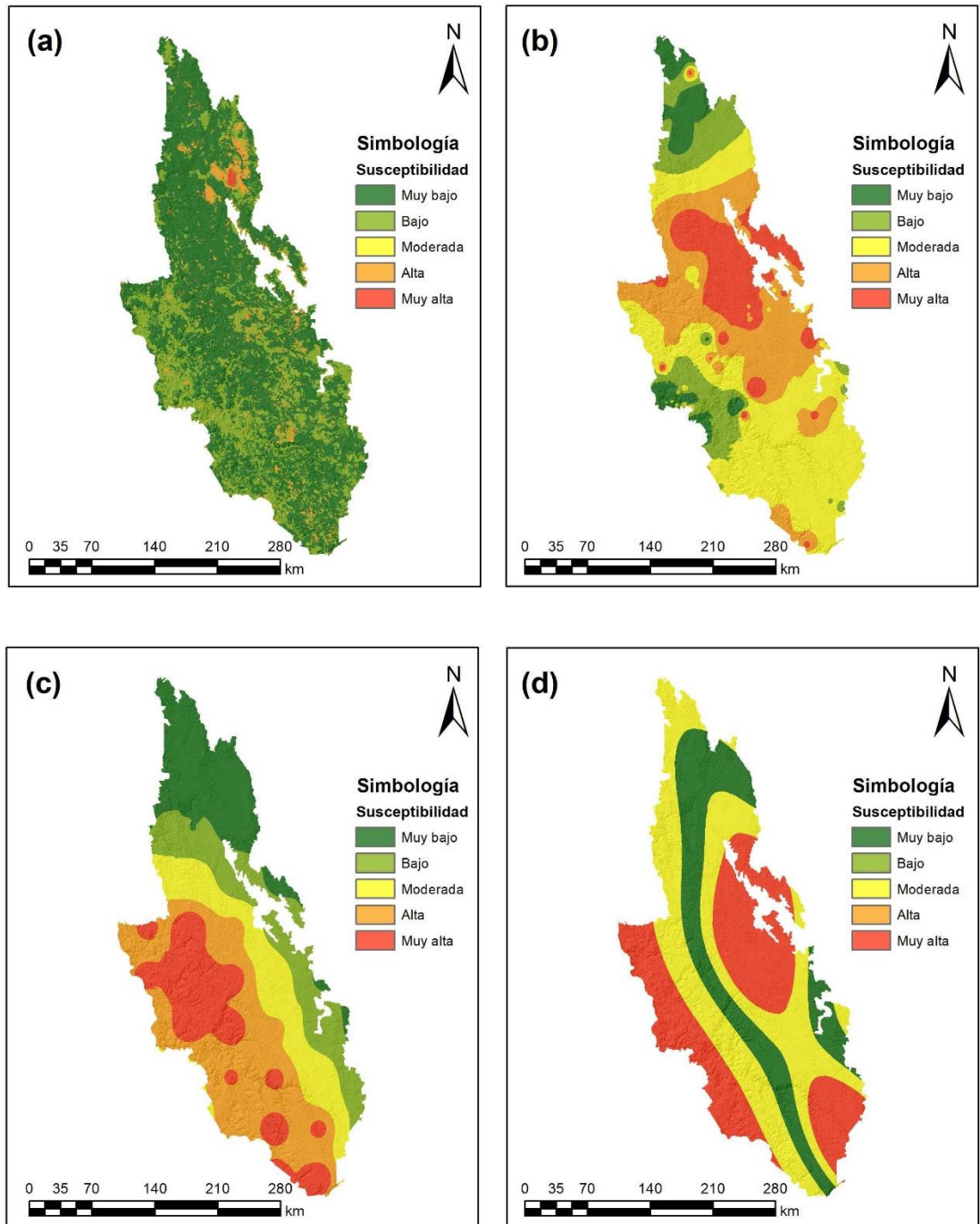


Figura 2. Estandarización de criterios. (a) Uso de suelo y vegetación, (b) magnitud del sismo, (c) precipitación media anual y (d) temperatura.

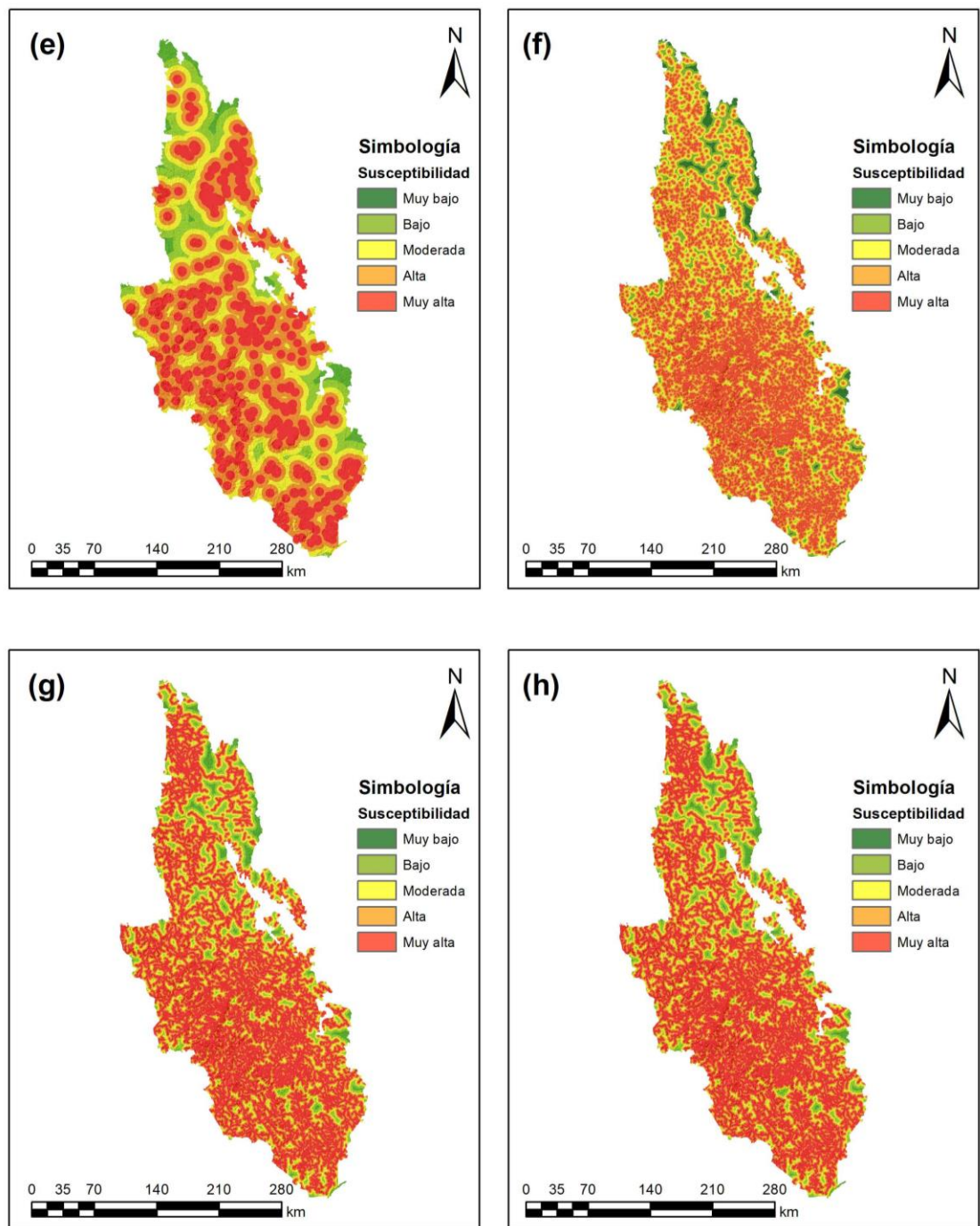


Figura 3. Estandarización de criterios. (e) Localidades urbanas, (f) localidades rurales, (g) caminos principales, (h) caminos secundarios.

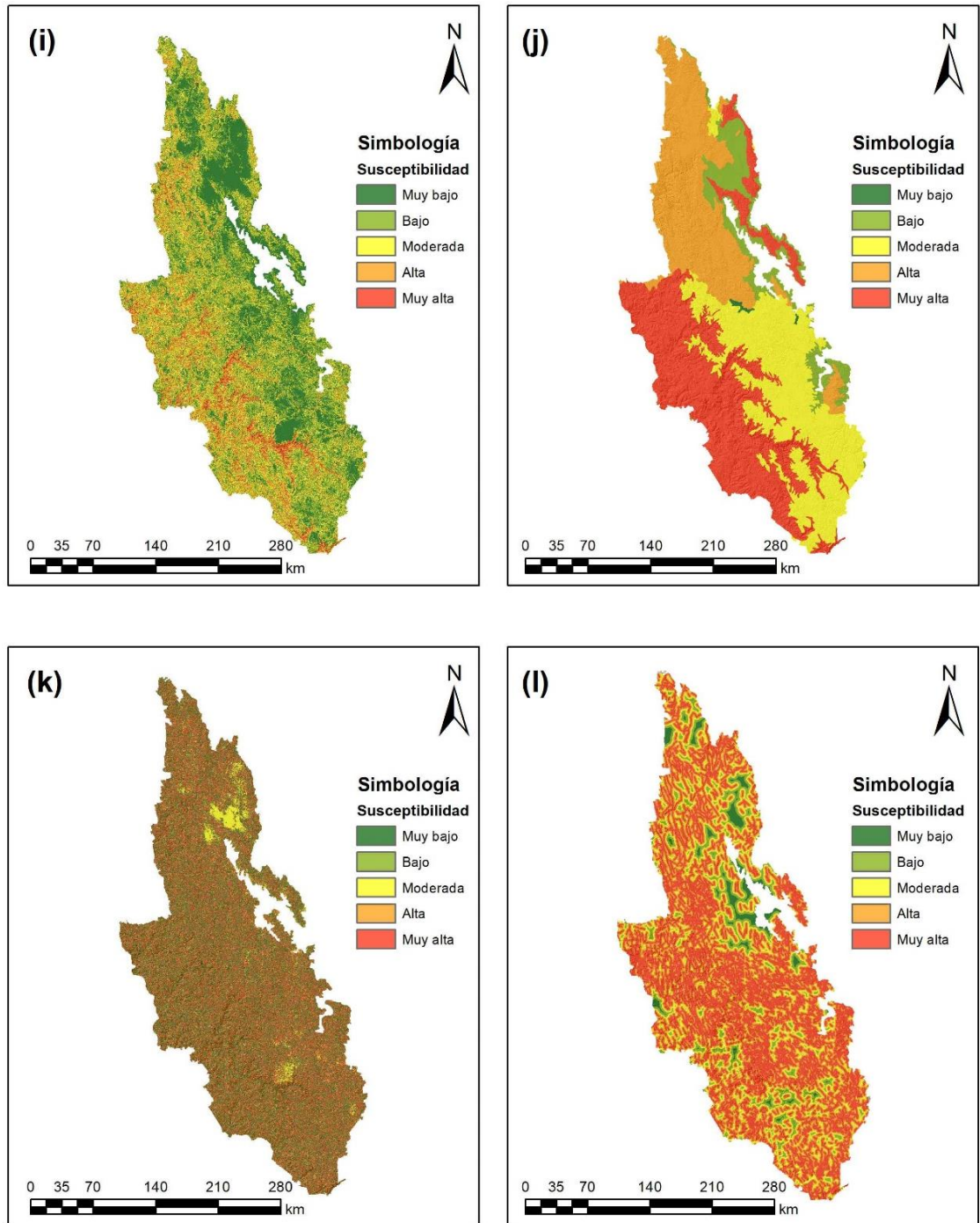


Figura 4. Estandarización de criterios. (i) Pendiente del terreno, (j) sistema de topoformas, (k) geomorfología, (l) fallas y fracturas.

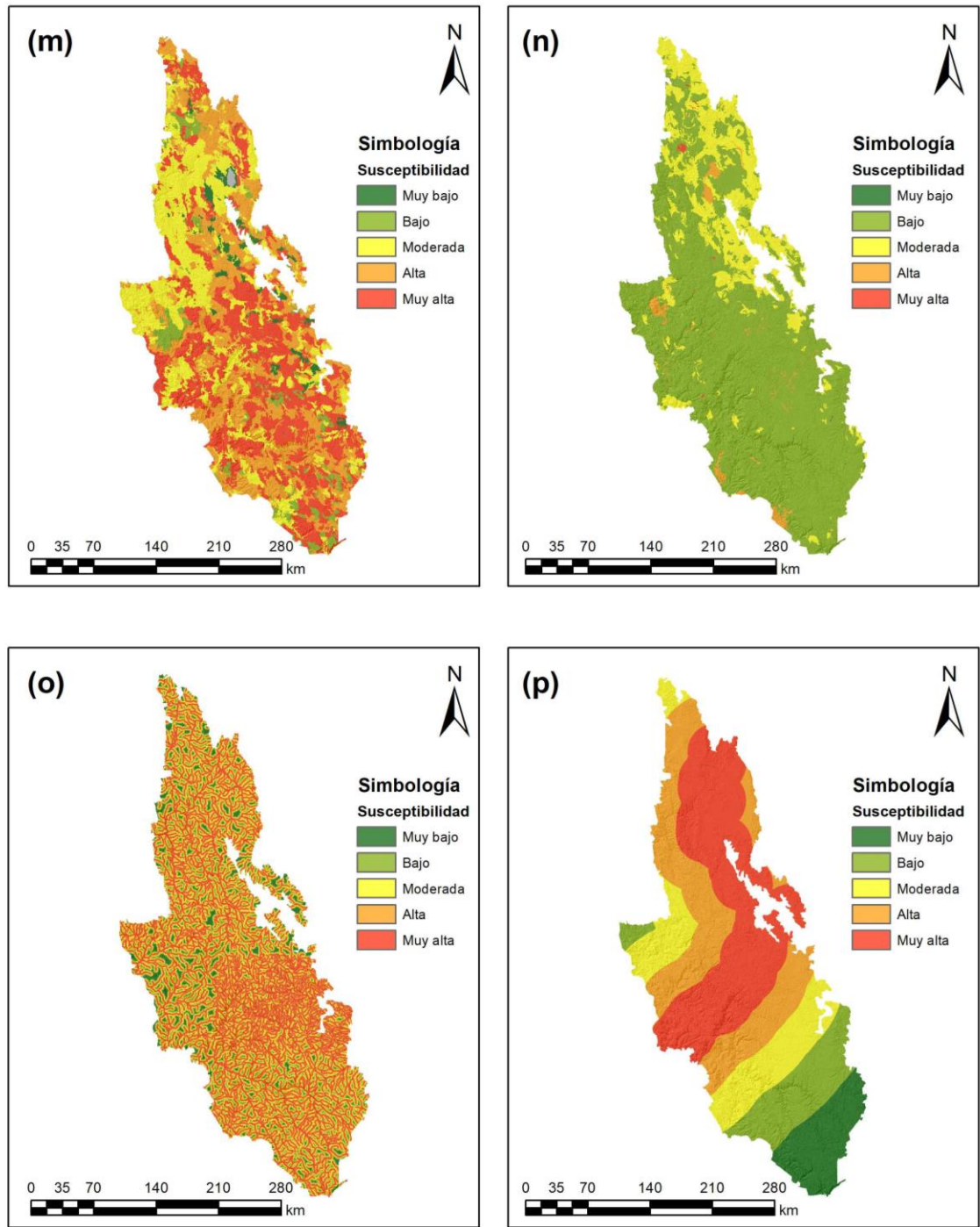


Figura 5. Estandarización de criterios. (m) Edafología, (n) litología, (o) hidrografía, (p) vías férreas.

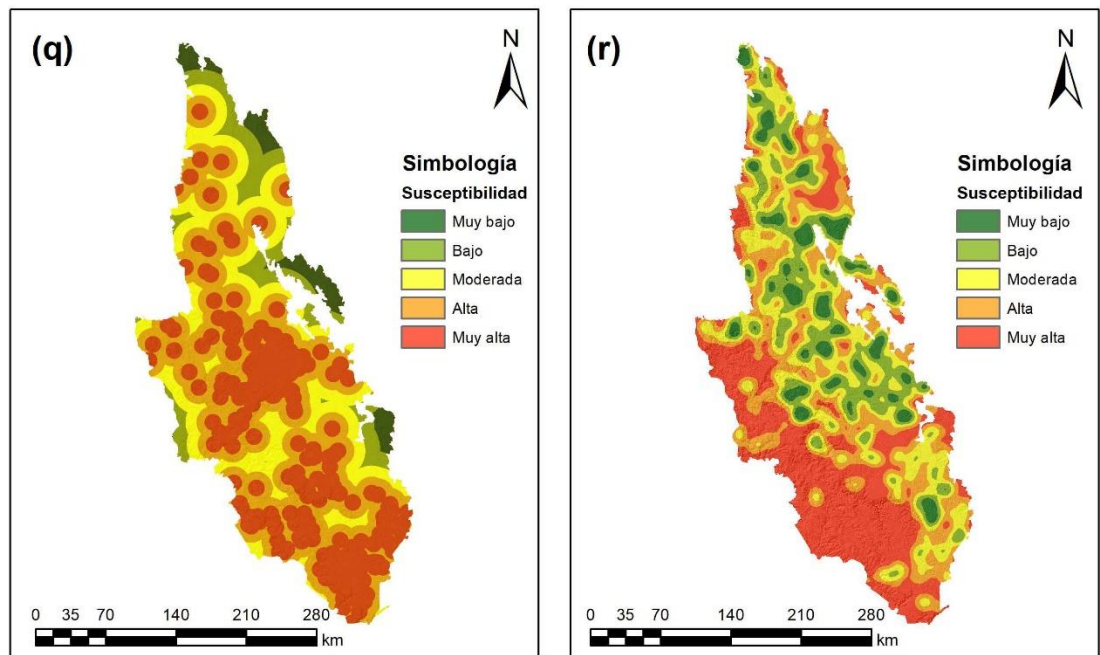


Figura 6. Estandarización de criterios. (q) Incendios forestales, (r) densidad forestal.



consideración uniforme para cada factor.

En el Gráfico 1 de pesos o importancias, se observan las variaciones de peso asignadas a cada criterio entre las diferentes metodologías. Los criterios como uso de suelo y vegetación y geomorfología también muestran diferencias significativas en ponderación, especialmente en AHP y AHP-IA. Estas diferencias subrayan la importancia de estos factores en el análisis, ya que reflejan la influencia del contexto geográfico y geomorfológico particular del área de estudio, contribuyendo de manera crucial a la identificación de zonas de alta susceptibilidad.

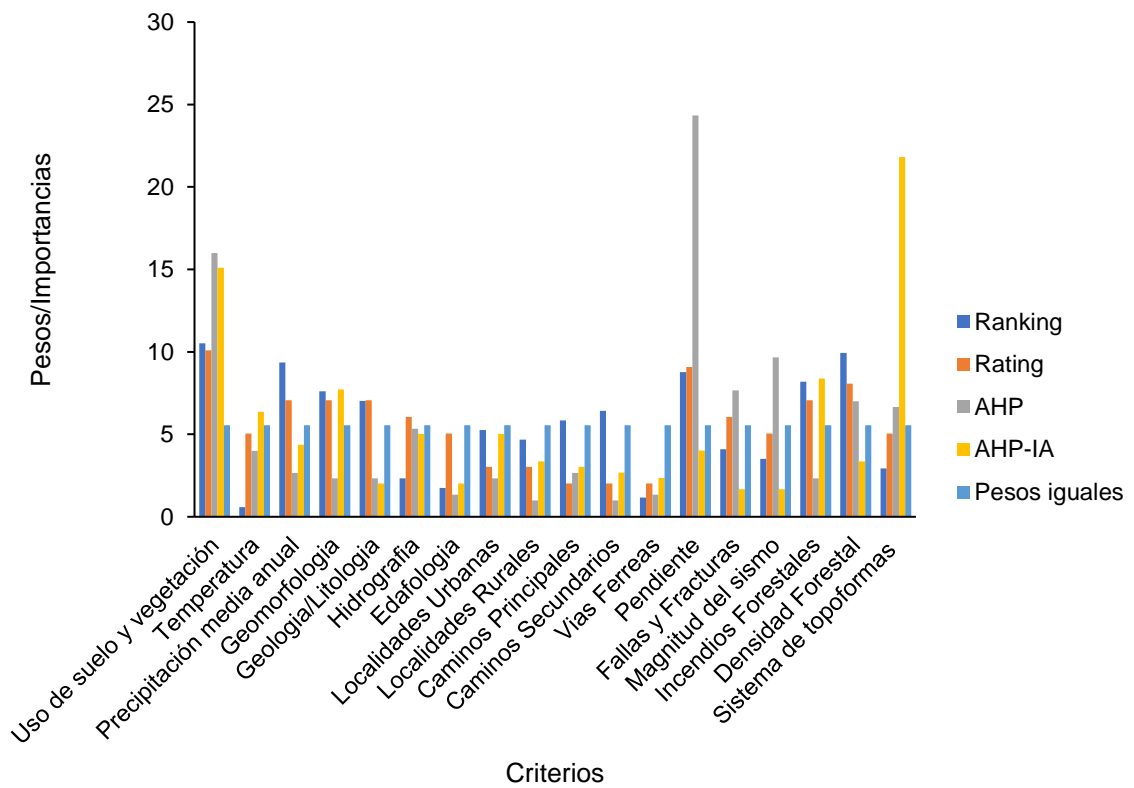
Distribución Espacial y Generación de Modelos

La aplicación del método EMC-SIG permitió evaluar la idoneidad del sitio para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos, esto facilitó la representación espacial de cinco niveles de susceptibilidad, basados en las cinco metodologías aplicadas. Las áreas de superficie correspondientes a cada nivel de susceptibilidad se detallan en el Cuadro 7. Se compararon las cinco metodologías de evaluación multicriterio (ponderación equitativa, ranking, rating, AHP, y AHP-IA) con un modelo de referencia generado por la CENAPRED. Los resultados muestran la distribución de superficies correspondientes a cada nivel de susceptibilidad, categorizados en cinco niveles: Muy Baja, Baja, Moderada, Alta, y Muy Alta. El modelo de CENAPRED destaca en la categoría de muy baja susceptibilidad con 15,736.03 km² (21.79%), mientras que la mayoría de las metodologías aplicadas no identificaron áreas en esta categoría, excepto AHP-IA con 6.03 km². En el nivel de baja susceptibilidad, AHP identifica 9,554.02 km²



Cuadro 6. Distribución de pesos de los criterios según metodologías de ponderación para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos.

No	Criterio	Ranking	Rating	AHP	AHP-IA	Ponderación equitativa
1	Uso de suelo y vegetación	11	10	16	15	5.55
2	Temperatura	1	5	4	6	5.55
3	Precipitación media anual	9	7	3	4	5.55
4	Geomorfología	8	7	2	8	5.55
5	Litología	7	7	2	2	5.55
6	Hidrografía	2	6	5	5	5.55
7	Edafología	2	5	1	2	5.55
8	Localidades urbanas	5	3	2	5	5.55
9	Localidades rurales	5	3	1	3	5.55
10	Caminos principales	6	2	3	3	5.55
11	Caminos secundarios	6	2	1	3	5.55
12	Vías férreas	1	2	1	2	5.55
13	Pendiente	9	9	24	4	5.55
14	Fallas y fracturas	4	6	8	2	5.55
15	Magnitud del sismo	4	5	10	2	5.55
16	Incendios forestales	8	7	2	8	5.55
17	Densidad forestal	10	8	7	3	5.55
18	Sistema de topoformas	3	5	7	22	5.55
		100	100	100	100	100



Gráfica 1. Variaciones en los pesos o importancias de los criterios entre metodologías de ponderación para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos.



Cuadro 7. Superficies clasificadas por nivel de susceptibilidad a deslizamientos según diferentes metodologías de ponderación.

NS	CENAPRED	Ponderación equitativa	Ranking	Rating	AHP	IA-AHP
Muy baja (1)	15736.03	0	0	0	0.28	6.028
Baja (2)	1795.55	615.29	3591.01	2529.31	9554.02	9373.09
Moderada (3)	18117.17	44139.73	50072.17	54646.91	42873.81	40214.93
Alta (4)	36546.13	27916.04	19007.48	15494.23	2122.82	22917.65
Muy Alta (5)	9.80	0.07	0.11	0.02	18117.55	157.65
Total	72204.68	72671.13	72670.77	72670.47	72668.48	72669.35

NS=Nivel de susceptibilidad.



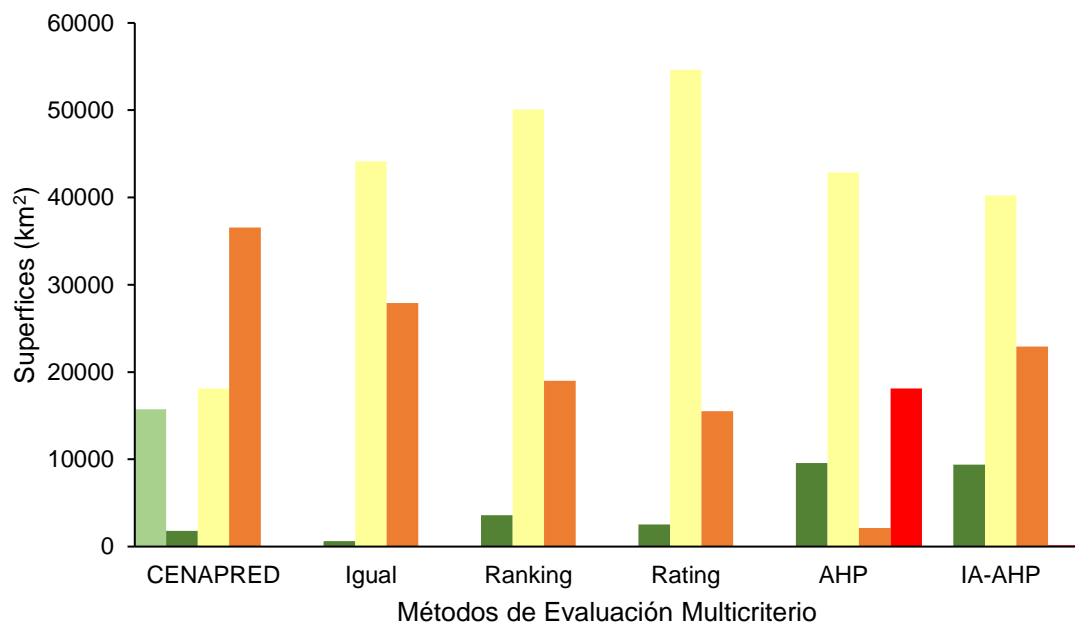
(13.15%), siendo mayor que en el modelo de CENAPRED, que asigna solo 1,795.55 km² (2.49%).

La susceptibilidad moderada es predominante en todas las metodologías, especialmente en ponderación equitativa con 44,139.73 km² (60.74%) y rating con 54,646.91 km² (75.20%), lo que sugiere una distribución equilibrada de factores de riesgo. En el nivel de alta susceptibilidad, CENAPRED asigna 36,546.13 km² (50.61%) del área, mientras que AHP-IA asigna 22,917.65 km² (31.5%), y AHP presenta solo 2,122.82 km² (2.92%). Finalmente, en la categoría de muy alta susceptibilidad, AHP identifica 18,117.55 km² (24.93%) del área, en contraste con las superficies reducidas asignadas por CENAPRED (9.80 km²) y AHP-IA (157.65 km²). Estas diferencias reflejan cómo la ponderación de criterios influye en los resultados, con la susceptibilidad moderada prevaleciendo en la mayoría de las metodologías, lo que sugiere una susceptibilidad media generalizada en la región (Gráfico 2).

Los modelos generados por cada metodología de evaluación multicriterio (AHP, AHP-IA, ponderación equitativa, ranking, rating y CENAPRED) presentan variaciones notables en la distribución de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos. El modelo AHP (Figura 7) concentró las áreas de alta y muy alta susceptibilidad en el centro-sur del área de estudio, con un índice de consistencia (CR) de 0.01, lo que indica una alta coherencia en la ponderación de factores (Saaty, 2016). Este modelo es comparable a estudios en Irán que utilizaron AHP y destacaron su capacidad para identificar áreas críticas con alta precisión (Pradhan *et al.*, 2022). Por su parte, el AHP-IA (Figura 8) mostró una mayor dispersión de zonas de alta susceptibilidad hacia el norte y un CR de 0.05,



reflejando una adaptabilidad mejorada mediante inteligencia artificial para capturar la variabilidad del terreno (Wang *et al.*, 2021). Este enfoque híbrido es consistente con investigaciones recientes en Irán que emplearon Fuzzy-TOPSIS y Fuzzy-ANP para predecir susceptibilidades (Tavakolifar *et al.*, 2023; Hong & Chen, 2019). El modelo de ponderación equitativa (Figura 9) distribuye predominantemente la susceptibilidad moderada y baja, evidenciando un enfoque uniforme y generalizado. Los modelos de ranking (Figura 10) y rating (Figura 11) aunque priorizan la categoría de susceptibilidad moderada, mostraron menor diferenciación en las áreas de alta susceptibilidad, similar a resultados obtenidos en estudios de EMC en Italia, donde la capacidad predictiva fue limitada por la ponderación de criterios (Romano *et al.*, 2015). En contraste, el modelo de referencia de CENAPRED (Figura 12) identifica una mayor proporción de áreas de muy baja susceptibilidad (21.79%), siguiendo un enfoque más conservador adecuado para planificación de usos de suelo y minimización de riesgos (CENAPRED, 2014; Gonzalez Huesca *et al.*, 2015). Aunque su enfoque conservador es útil, carece de la especificidad requerida para decisiones detalladas de mitigación (Guzzetti *et al.*, 2012).



Gráfica 2. Comparación de superficies clasificadas por nivel de susceptibilidad a deslizamientos según métodos de evaluación multicriterio.

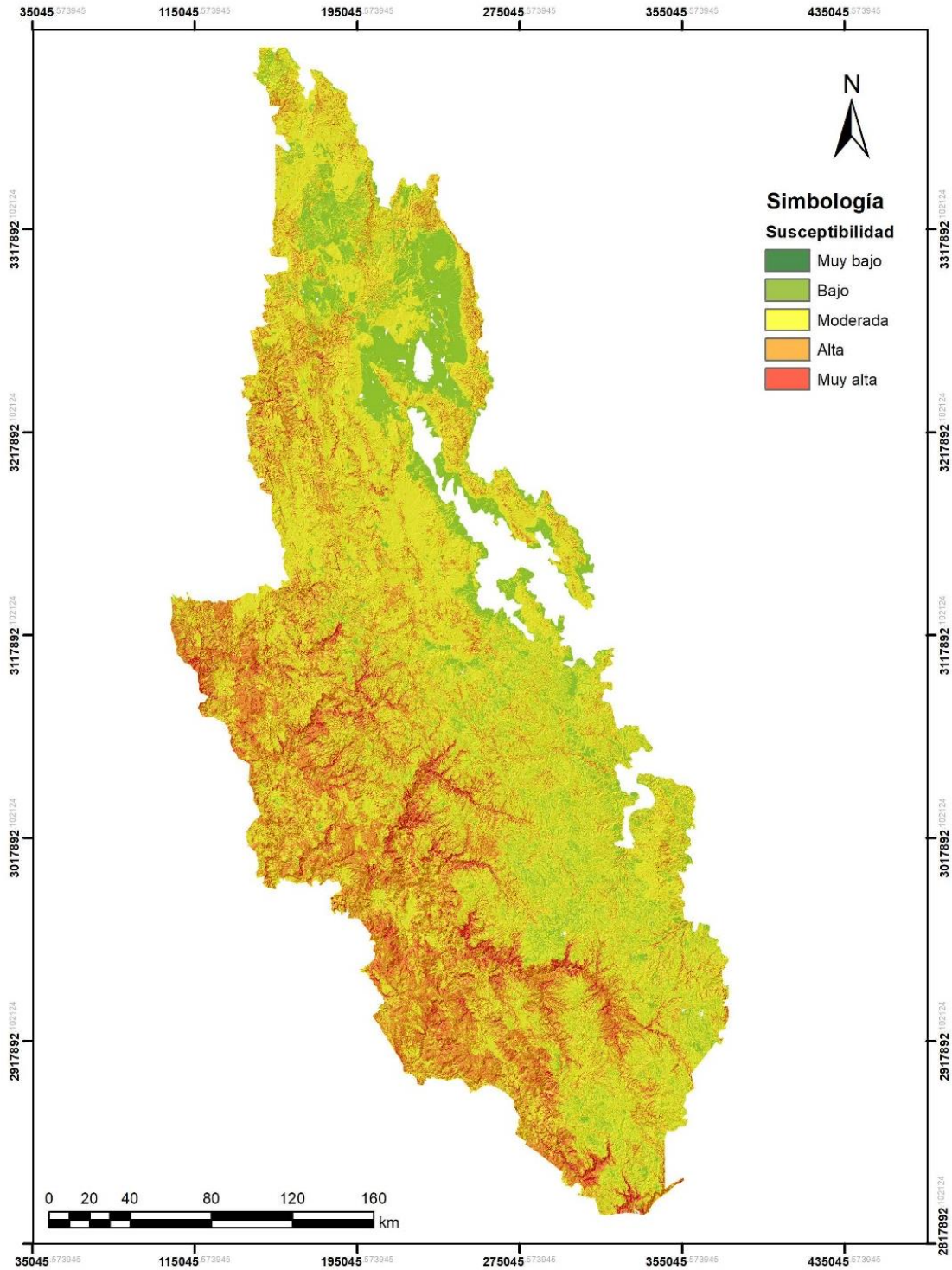


Figura 7. Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo AHP.

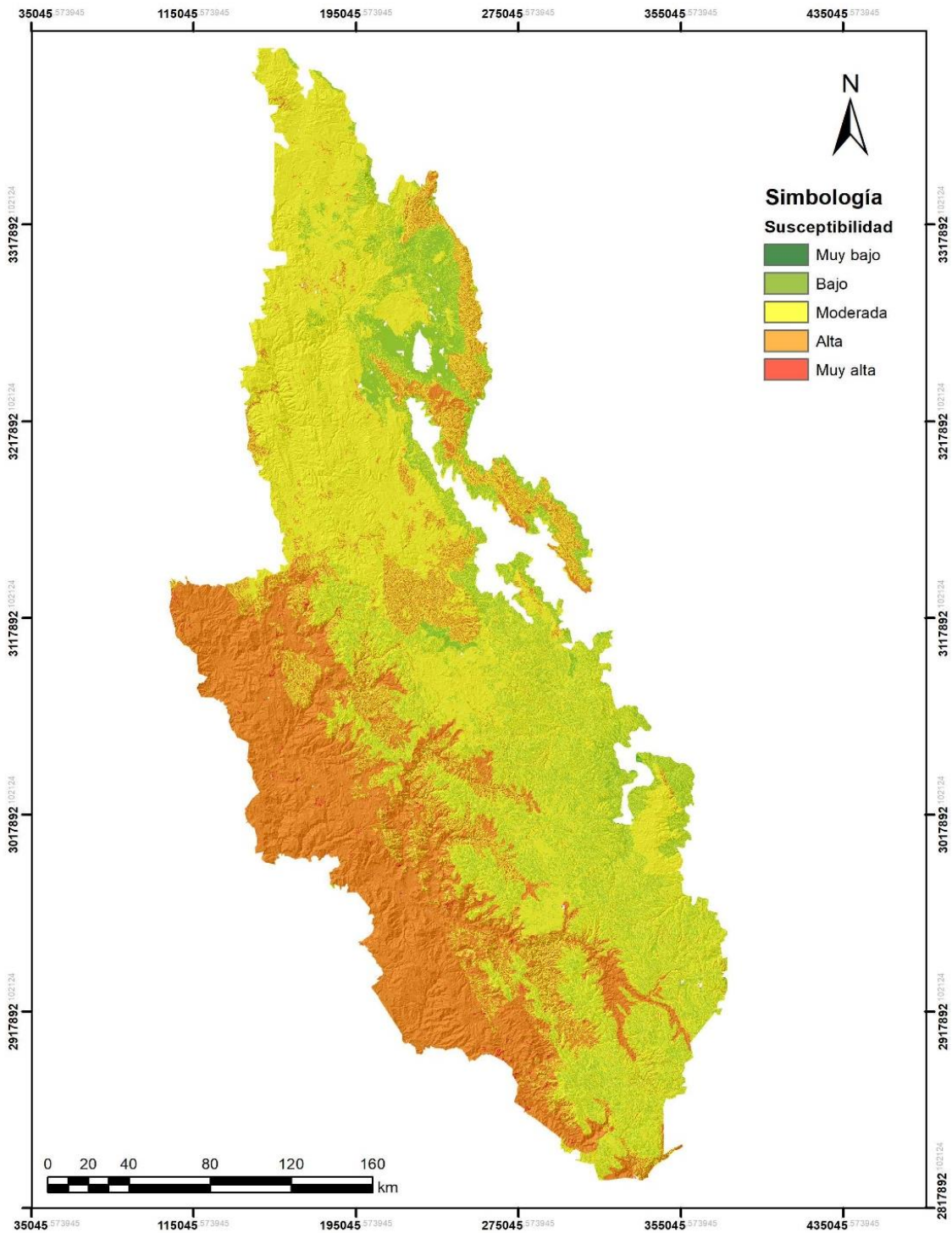


Figura 8. Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo AHP-IA.

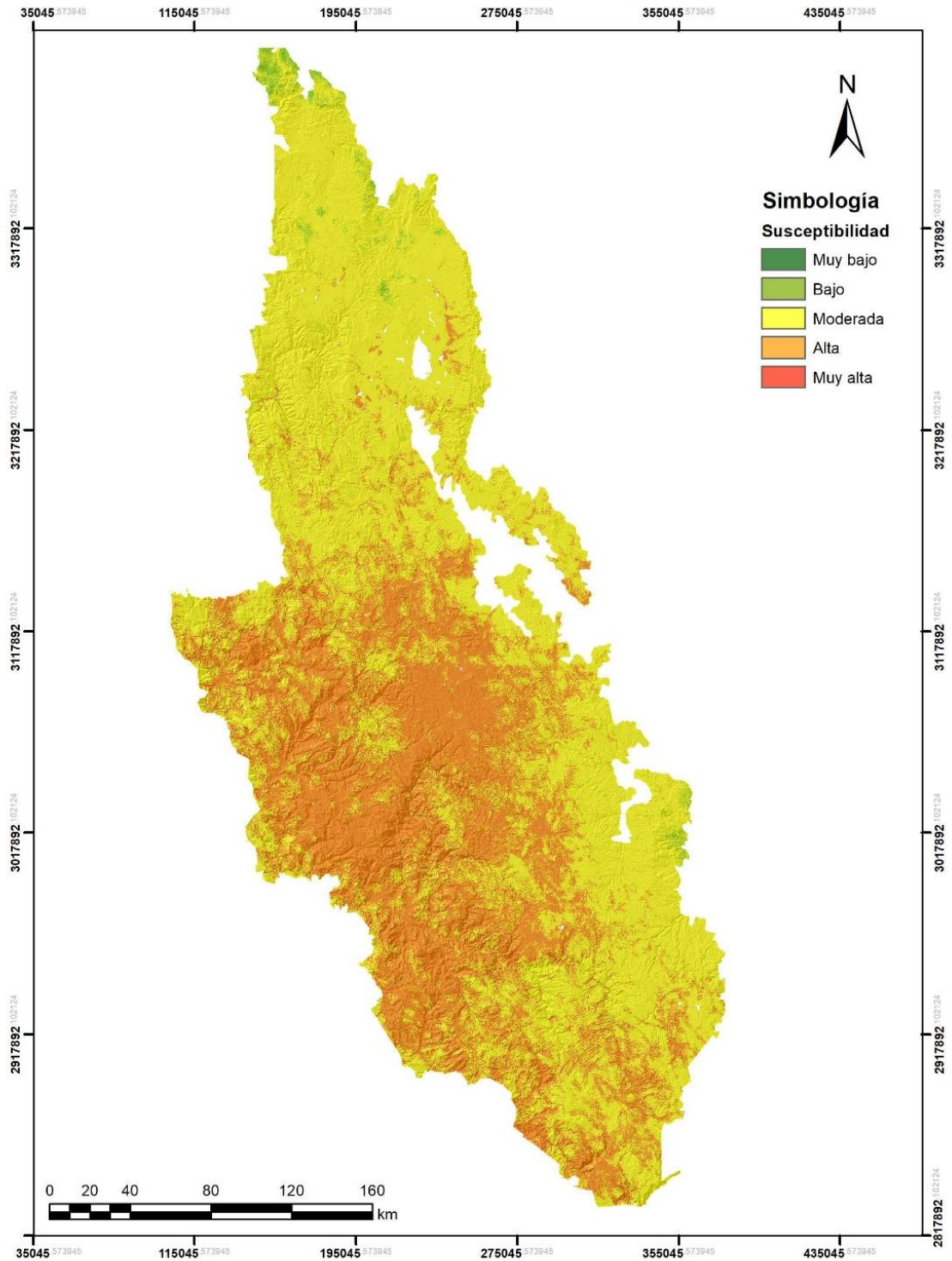


Figura 9. Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo Pesos Iguales.

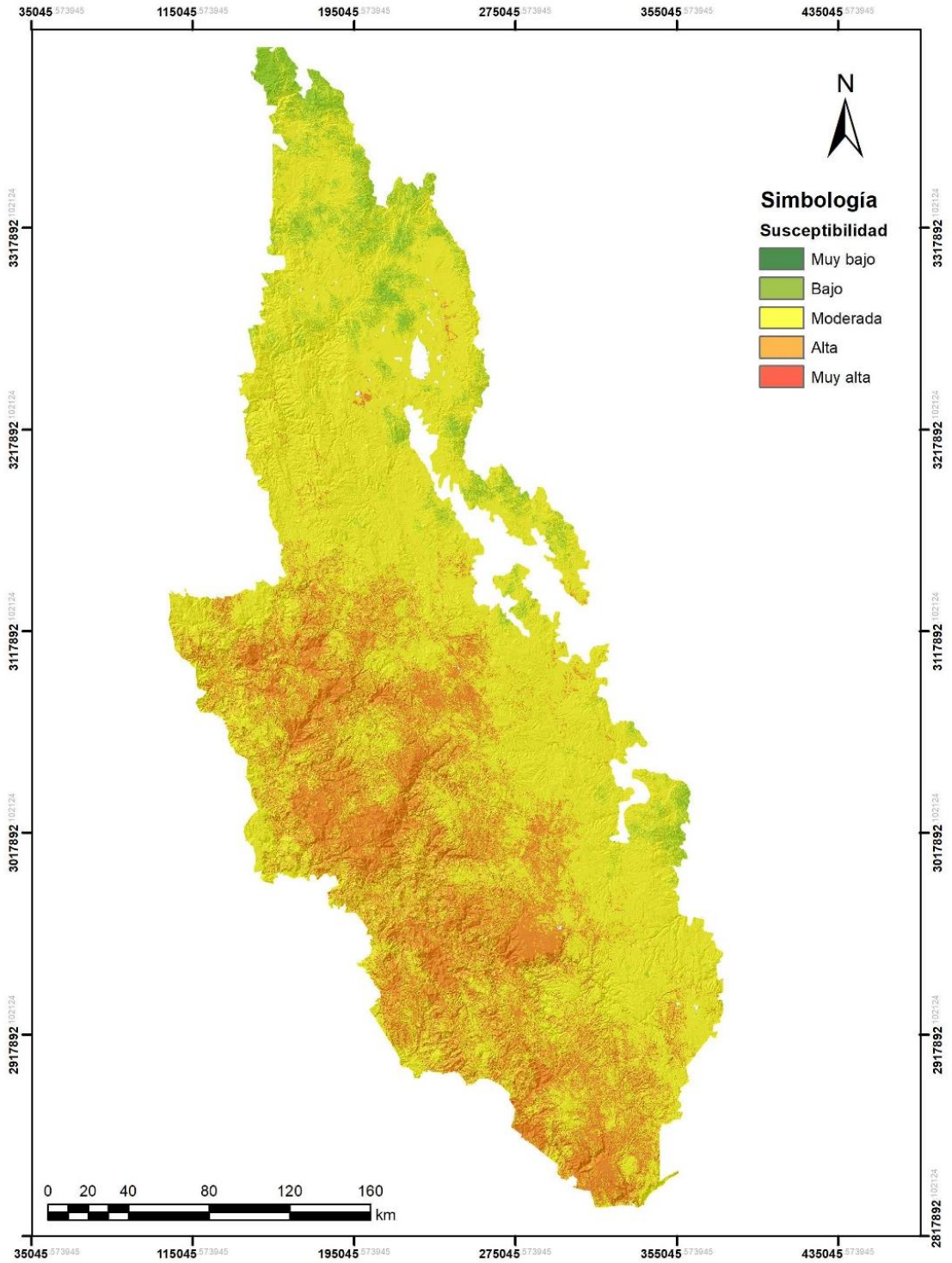


Figura 10. Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo Ponderación equitativa.

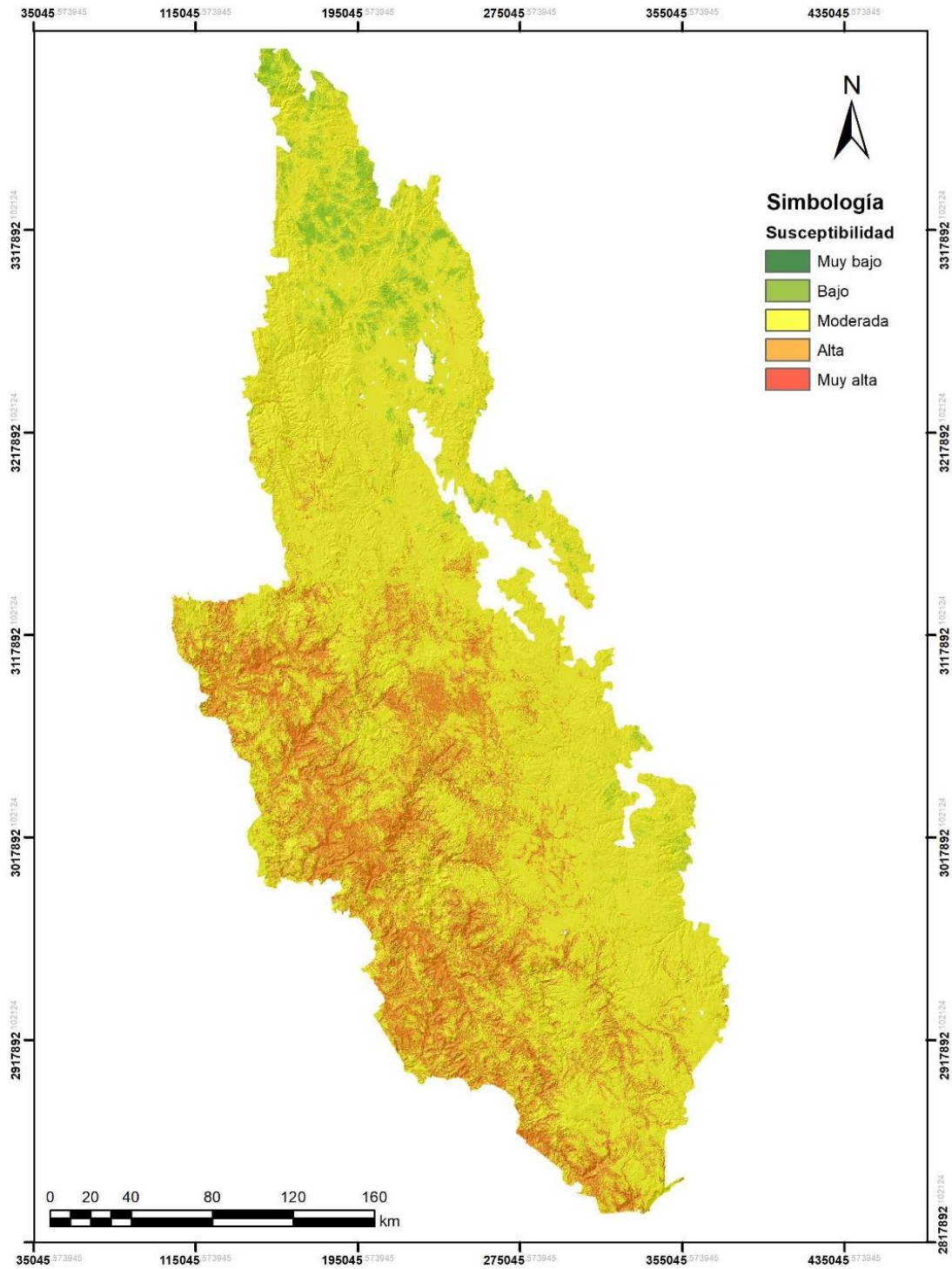


Figura 11. Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo ponderación equitativa.

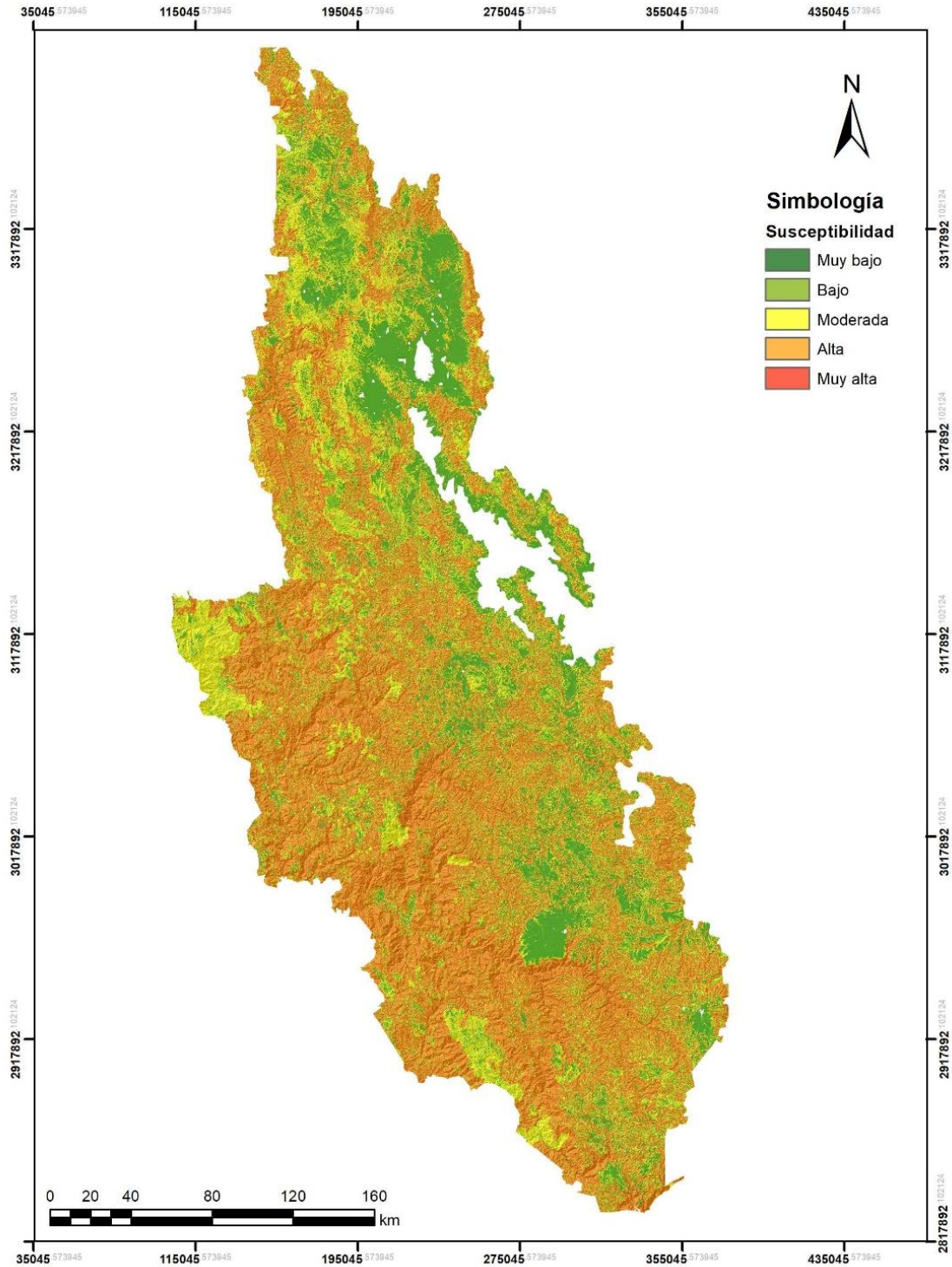


Figura 12. Distribución espacial de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua: Modelo de referencia CENAPRED.



Tablas de Contingencia de Cruce de Información

La generación de las tablas de contingencia de los modelos de susceptibilidad a deslizamientos de laderas se realizó mediante un análisis comparativo de los resultados obtenidos por las metodologías aplicadas, a través del cruce de información entre los niveles de susceptibilidad asignados a diferentes elementos territoriales, los cuales fueron lotes mineros, caminos, sitios turísticos, localidades rurales y vías férreas. Las tablas de contingencia permitieron evaluar la consistencia y robustez de cada metodología (AHP, AHP-IA, ranking, rating, ponderación equitativa), analizando la sensibilidad de cada modelo frente a las variaciones en los criterios considerados. Este cruce de elementos proporcionó información sobre las similitudes y diferencias en la distribución de los niveles de susceptibilidad, permitiendo identificar patrones consistentes y posibles sesgos asociados a cada metodología.

Por ejemplo, en el Cuadro 8 se muestra el modelo de ponderación equitativa y se observó una tendencia a concentrar los elementos territoriales en niveles de susceptibilidad moderada y alta. Los lotes mineros se distribuyeron principalmente entre los niveles moderado (2,205) y alto (4,055), mientras que los caminos presentaron una mayor asignación en los niveles moderado (23,048) y alto (27,846). Este patrón también se reflejó en las localidades rurales, que se concentraron mayoritariamente en niveles moderados y altos. Cabe destacar que ningún elemento fue asignado a la categoría de muy baja susceptibilidad, lo que podría sugerir una menor diferenciación en este modelo.



Cuadro 8. Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo de pesos iguales: Modelo Ponderación equitativa.

Elemento territorial	Nivel de susceptibilidad				
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)
Lotes Mineros	0	7	2205	4055	0
Camino	0	4134	23048	27846	0
Sitios turísticos	0	0	23827	23871	0
Localidades rurales	0	6	3900	5786	0
Vías Férreas	0	1	3	3	0



En comparación el modelo de ranking mostró mayor concentración en el nivel moderado, destacándose los caminos (26,490) y sitios turísticos (17,844) en esta categoría (Cuadro 9). Aunque también se identificaron áreas en el nivel alto de susceptibilidad, la asignación fue menos pronunciada en comparación con Pesos Iguales, lo que sugiere un enfoque más equilibrado.

El modelo de rating presentó un patrón similar al ranking, con una predominancia en la susceptibilidad moderada para todos los criterios analizados, destacan los caminos con 29,906 y los lotes mineros con 3,598 en este nivel (Cuadro 10). En general, se observa una menor asignación de áreas a los niveles de muy baja y muy alta susceptibilidad, lo cual indica un enfoque de ponderación menos polarizado.

Por otro lado, el modelo AHP presenta una distribución más variada en todos los niveles de susceptibilidad, destacándose las asignaciones en los niveles bajo (12,326) y alto (7,604) para los caminos, y en los niveles moderado y muy alto para los lotes mineros (820 en muy alta susceptibilidad). Esta distribución sugiere que AHP proporciona un enfoque más detallado en la clasificación de riesgos (Cuadro 11), lo que concuerda con estudios internacionales que destacan su utilidad en la identificación de áreas críticas (Akgun, 2012; Pradhan & Lee, 2022).

El modelo AHP-IA mostró una mayor variabilidad en la distribución de los niveles de susceptibilidad, con asignaciones significativas en niveles bajos y moderados. Por ejemplo, los caminos (9,296 en nivel bajo y 20,690 en moderado) y localidades rurales (1,544 en nivel bajo y 4,298 en moderado) reflejaron una distribución más equilibrada entre las categorías (Cuadro 12). Esta variabilidad



Cuadro 9. Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo ranking.

Elemento Territorial	Nivel de susceptibilidad				
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)
Lotes Mineros	0	87	2950	3766	0
Caminos	0	676	26490	17794	0
Sitios turísticos	0	0	17844	17858	0
Localidades rurales	0	68	5807	3820	0
Vías Férreas	0	1	3	3	0



Cuadro 10. Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo rating.

Elemento Territorial	Nivel de susceptibilidad				
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)
Lotes Mineros	0	23	3598	3349	0
Caminos	0	998	29906	13330	0
Sitios turísticos	0	0	66	49	0
Localidades rurales	0	87	7039	2567	0
Vías Férreas	0	1	3	2	0



Cuadro 11. Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo AHP.

Elemento Territorial	Nivel de susceptibilidad				
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)
Lotes Mineros	0	281	3667	3537	820
Caminos	0	12326	27739	7604	597
Sitios turísticos	0	28	58	22	7
Localidades rurales	0	2253	6317	1082	40
Vías férreas	0	3	3	3	2



Cuadro 12. Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo AHP-IA

Elemento Territorial	Nivel de susceptibilidad				
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)
Lotes Mineros	77	540	2096	3758	335
Caminos	11	9296	20690	13720	587
Sitios turísticos	0	12	50	47	6
Localidades rurales	1	1544	4298	3775	77
Vías férreas	0	3	3	3	0



es consistente con investigaciones recientes que destacan la capacidad de los modelos híbridos para capturar las complejidades del terreno (Tavakolifar *et al.*, 2023).

Finalmente, el Cuadro 13 modelo de referencia CENAPRED, basado en el enfoque nacional de evaluación de riesgos, presenta un comportamiento diferente, mostrando una significativa asignación en niveles de muy baja susceptibilidad, especialmente para caminos (18,562) y localidades rurales (3,363). Esto resalta diferencias clave entre los enfoques conservadores y los basados en metodologías multicriterio (EMC-SIG), donde CENAPRED tiende a subestimar áreas de mayor riesgo en comparación con los modelos AHP y AHP-IA.

Los resultados obtenidos muestran cómo la selección de la metodología de ponderación influye en la clasificación de las áreas de susceptibilidad a deslizamientos. Las metodologías basadas en EMC-SIG, como AHP y AHP-IA, ofrecen una mayor diferenciación de los niveles de susceptibilidad, permitiendo identificar áreas con mayor precisión. Este hallazgo concuerda con estudios internacionales como los de Guzzetti *et al.* (2012) y Chen *et al.* (2021), que destacan la eficacia de las metodologías multicriterio en la evaluación de riesgos geológicos.

Por otro lado, metodologías como Pesos Iguales y Rating presentan una distribución más homogénea de los elementos territoriales, lo que podría limitar su capacidad para capturar variaciones específicas en los criterios topográficos y biofísicos. Estudios como los de Reichenbach *et al.* (2005) sugieren que este



Cuadro 13. Distribución de elementos territoriales según niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el modelo de referencia CENAPRED.

Elemento Territorial	Nivel de susceptibilidad				
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)
Lotes Mineros	672	218	1555	4307	7
Caminos	18562	1730	12797	19295	3
Sitios turísticos	57	1	11	45	0
Localidades rurales	3363	221	1841	4267	0
Vías Férreas	3	3	3	3	0



enfoque puede ser adecuado para análisis preliminares, pero carece de la precisión necesaria para la toma de decisiones detalladas.

El modelo de CENAPRED, aunque conservador, destaca por su aplicabilidad en evaluaciones nacionales de riesgos, proporcionando una metodología general para la planificación territorial. Sin embargo, su tendencia a subestimar las áreas de alta susceptibilidad limita su utilidad en contextos locales o regionales donde se requiere un mayor nivel de detalle.

Un punto crítico identificado en esta investigación es la falta de inventarios históricos de deslizamientos en la Sierra Madre Occidental. Esta falta de datos históricos representa una limitante para validar empíricamente los modelos propuestos, una situación también mencionada por Hong & Chen (2019) en contextos internacionales. La ausencia de registros históricos no solo dificulta la verificación de los resultados obtenidos, sino que también limita la capacidad de refinar los modelos en función de datos reales. Los inventarios históricos son herramientas fundamentales en la modelación de susceptibilidad, ya que proporcionan una base para calibrar las metodologías y ajustar los pesos asignados a los criterios según la frecuencia y severidad de eventos pasados.

La creación de un inventario regional de deslizamientos permitiría no solo mejorar la calibración y validación de los modelos futuros, sino también establecer una línea base para evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación y planificación territorial. Este tipo de esfuerzo ha demostrado ser efectivo en otros contextos internacionales, como en Italia (Guzzetti et al., 2012), donde el desarrollo de inventarios detallados ha permitido avanzar significativamente en la comprensión y gestión de los riesgos asociados a desli-



zamientos. Además, un inventario local proporcionaría información valiosa para la implementación de tecnologías emergentes, como sensores geotécnicos y sistemas de alerta temprana, que pueden integrarse con modelos como AHP-IA para mejorar la predicción y la respuesta frente a eventos de deslizamientos.

En el caso específico de la Sierra Madre Occidental, un inventario no solo beneficiaría la validación de modelos generados, sino que también permitiría el desarrollo de metodologías híbridas que integren datos históricos con técnicas avanzadas de inteligencia artificial, como las empleadas en modelos AHP-IA (Chen et al., 2021). La implementación de un inventario histórico también podría facilitar la colaboración entre diferentes niveles de gobierno, instituciones académicas y comunidades locales, promoviendo un enfoque participativo.

La contribución principal de este manuscrito es la generación de modelos de susceptibilidad a deslizamientos que sirven como herramientas para la gestión del riesgo en una región que no cuenta de registros históricos de deslizamientos. Estos modelos ofrecen un enfoque para la prevención de riesgos y la planificación territorial, generando información que puede ser aplicada por las autoridades locales y los gobiernos municipales en la identificación de áreas vulnerables y en la toma de decisiones para la mitigación del riesgo. La información generada permite orientar el desarrollo urbano, la infraestructura vial y las actividades económicas hacia zonas con menor riesgo, contribuyendo de esta manera a la reducción de la vulnerabilidad de las comunidades frente a eventos de deslizamiento. Además, el uso de metodologías como AHP y AHP-IA puede proporcionar información detallada sobre áreas que requieren monitoreo



constante o medidas de mitigación específicas, lo cual resulta relevante para la gestión de desastres y la reducción del riesgo.

La aplicación de los modelos desarrollados en este estudio podría tener un impacto significativo en la gestión del riesgo a nivel local y regional. Los gobiernos municipales podrían utilizar estos modelos para integrar la información de susceptibilidad en sus planes de desarrollo y ordenamiento territorial, asegurando que el crecimiento urbano y la expansión de infraestructura se realicen en zonas seguras y con menor riesgo de deslizamientos. De igual forma, las autoridades locales podrían implementar programas de educación y sensibilización comunitaria basados en la información de susceptibilidad proporcionada por estos modelos, con el objetivo de preparar a las comunidades para responder de manera efectiva ante posibles eventos de deslizamiento.

El desarrollo futuro de la investigación debe centrarse en varios aspectos clave que permitirán ampliar y mejorar los resultados obtenidos. En primer lugar, se requiere la creación de un inventario regional de deslizamientos en la Sierra Madre Occidental. La ausencia de datos históricos representa una limitante considerable para la validación empírica de los modelos y para la comprensión de los factores desencadenantes de estos fenómenos. Un inventario exhaustivo permitirá no solo validar los resultados de esta investigación, sino también crear una base de datos sólida que sirva de referencia para futuras investigaciones y para la formulación de políticas públicas orientadas a la gestión del riesgo de desastres. Este inventario debe incluir información sobre la ubicación, características y causas de los deslizamientos, y debe ser actualizado constantemente para reflejar las condiciones cambiantes de la región.



En segundo lugar, la integración de tecnologías avanzadas puede jugar un papel crucial en la mejora de la precisión y la capacidad predictiva de los modelos. El uso de drones para el monitoreo aéreo y en tiempo real de áreas susceptibles podría proporcionar información detallada sobre las condiciones del terreno, mientras que los sensores geotécnicos instalados en sitios estratégicos permitirían medir la estabilidad del suelo y detectar cambios que puedan preceder a un evento de deslizamiento. Estas tecnologías, combinadas con técnicas de observación remota, proporcionarían una visión más completa y precisa de las condiciones del terreno, lo cual es fundamental para una evaluación efectiva del riesgo.

El uso de inteligencia artificial y aprendizaje automático es otra área prometedora para el desarrollo futuro de la investigación. Estas tecnologías pueden mejorar significativamente la capacidad predictiva de los modelos, ya que permiten analizar grandes volúmenes de datos y detectar patrones que pueden no ser evidentes mediante métodos tradicionales. La implementación de algoritmos de aprendizaje automático podría ayudar a ajustar las ponderaciones de los criterios en función de nuevas evidencias y a mejorar la precisión de los modelos a lo largo del tiempo. Además, el desarrollo de metodologías híbridas que combinen enfoques de evaluación multicriterio con inteligencia artificial podría resultar en modelos más robustos y adaptativos, capaces de responder de manera efectiva a cambios en las condiciones ambientales y a la disponibilidad de nuevos datos.

La colaboración interinstitucional también es fundamental para el desarrollo de futuros trabajos. La participación de instituciones académicas,



organismos gubernamentales y comunidades locales permitirá mejorar la calidad de la información recopilada y garantizar que los modelos de susceptibilidad desarrollados sean relevantes y aplicables a las necesidades específicas de la región. La participación comunitaria, en particular, puede jugar un papel importante en la recopilación de datos y en la implementación de medidas preventivas. Las comunidades locales tienen un conocimiento profundo del entorno en el que viven, y su participación puede mejorar la precisión de los modelos y garantizar que las medidas de mitigación sean culturalmente apropiadas y efectivas.

Además, el desarrollo de políticas públicas basadas en la información generada por los modelos de susceptibilidad es una de las áreas de trabajo futuro más importantes. Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados por las autoridades locales y regionales para guiar el desarrollo territorial hacia zonas con menor riesgo de deslizamientos, reduciendo así la exposición de la población a riesgos potenciales. Esto incluye la planificación del desarrollo urbano, la construcción de infraestructura vial, y la implementación de medidas de protección en áreas críticas. La integración de la información de susceptibilidad en los planes de ordenamiento territorial es esencial para asegurar un desarrollo sostenible y seguro en la Sierra Madre Occidental.

Finalmente, el desarrollo de metodologías híbridas que combinen la inteligencia artificial con enfoques de evaluación multicriterio podría resultar en modelos más robustos y adaptativos, capaces de integrar grandes volúmenes de datos y de ajustar las ponderaciones de los criterios en función de nuevas evidencias o cambios en las condiciones ambientales. La colaboración



interinstitucional y la participación de las comunidades locales en la recopilación de datos también podrían ser elementos clave para mejorar la calidad de la información y asegurar que los modelos de susceptibilidad sean relevantes y aplicables a las necesidades específicas de la región.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En conclusión, la presente investigación proporciona una base sólida para la evaluación y gestión de la susceptibilidad a deslizamientos en la Sierra Madre Occidental, ofreciendo herramientas y metodologías que pueden ser utilizadas por las autoridades locales y regionales para mitigar los riesgos y reducir la vulnerabilidad de las comunidades. La aplicación de metodologías multicriterio, en combinación con tecnologías de monitoreo y el desarrollo de un inventario regional de deslizamientos, puede contribuir significativamente a una gestión más efectiva del riesgo de desastres, asegurando un desarrollo territorial más seguro y sostenible. La colaboración entre instituciones académicas, gubernamentales y comunidades locales será esencial para llevar a cabo este trabajo futuro y garantizar la protección de la población y el territorio frente a los riesgos naturales.

La ausencia de un inventario histórico de deslizamientos en la Sierra Madre Occidental represento una limitación, no solo para la validación de los modelos propuestos, sino también para la comprensión más profunda de los factores que desencadenan estos fenómenos en la región. Sin embargo, la falta de registros previos no resta valor a la relevancia de los modelos desarrollados en este estudio. Al contrario, pone de manifiesto la necesidad de generar y mantener registros de eventos futuros. Dichos registros podrían proporcionar una base empírica para mejorar y ajustar continuamente los modelos de susceptibilidad, incrementando su precisión y aplicabilidad. Además, la creación de un inventario regional de deslizamientos tendría un impacto significativo en la gestión del riesgo de desastres, ya que permitiría una planificación territorial más



informada y una toma de decisiones más robusta en relación con las medidas de mitigación.

El enfoque preventivo que ofrecen los modelos desarrollados en este estudio es relevante para los gobiernos municipales y las autoridades locales. A menudo, la gestión del riesgo de desastres se aborda de manera reactiva, lo cual puede tener consecuencias devastadoras para las comunidades afectadas. En contraste, estos modelos permiten a los tomadores de decisiones adoptar una postura proactiva, anticipándose a los riesgos y priorizando acciones que reduzcan la vulnerabilidad de la población y la infraestructura. Esto incluye desde la implementación de medidas de estabilización de laderas en áreas de alta susceptibilidad hasta la restricción del desarrollo urbano en zonas identificadas como de riesgo. Así, la integración de la información de susceptibilidad en los planes de ordenamiento territorial podría ser una herramienta clave para garantizar un desarrollo seguro y sostenible en la región.

Los resultados también resaltan la utilidad de las metodologías AHP y AHP-IA para identificar áreas específicas que requieren monitoreo constante o intervenciones específicas. En el caso de la Sierra Madre Occidental, la alta variabilidad geológica y topográfica hace que estas metodologías sean particularmente adecuadas para capturar la complejidad del entorno físico. El uso de AHP, que se basa en la ponderación de criterios mediante el juicio de expertos, proporciona un enfoque detallado que puede guiar acciones precisas en áreas críticas. Esto es especialmente importante en un contexto donde las comunidades vulnerables están expuestas a riesgos naturales debido a la falta de infraestructura adecuada y la presión creciente sobre los recursos naturales.



Por otro lado, las metodologías como Ranking, Rating y Pesos Iguales ofrecen una perspectiva más equilibrada y menos detallada, que puede ser útil para estudios exploratorios o preliminares en áreas donde se requiere una visión general del riesgo antes de pasar a análisis más detallados. Estos enfoques permiten una evaluación rápida y pueden servir como punto de partida para investigaciones más exhaustivas. Sin embargo, su menor capacidad para diferenciar entre niveles de riesgo subraya la necesidad de combinarlos con metodologías más precisas, como AHP y AHP-IA, cuando se busca implementar medidas específicas de mitigación.

El modelo de CENAPRED, por su parte, tiende a ser más conservador, clasificando una mayor parte del territorio en niveles de muy baja susceptibilidad. Si bien este enfoque puede ser adecuado para minimizar la exposición al riesgo en términos de planificación del uso del suelo, su utilidad podría estar limitada en contextos donde es necesario tomar decisiones específicas sobre mitigación y respuesta ante deslizamientos. El enfoque conservador del modelo de CENAPRED podría ser ventajoso en contextos de incertidumbre o cuando se busca aplicar el principio de precaución, pero carece de la especificidad que ofrecen las metodologías basadas en el análisis jerárquico.

En términos de gestión del riesgo de desastres, la capacidad de diferenciar entre niveles de susceptibilidad tiene implicaciones directas para la planificación y priorización de acciones de mitigación. Los modelos más detallados permiten a las autoridades identificar áreas donde las medidas preventivas, como la reforestación de zonas críticas, la construcción de barreras de retención o el establecimiento de rutas de evacuación, son más necesarias. Además, la



información generada puede utilizarse para sensibilizar a las comunidades sobre los riesgos a los que están expuestas, fomentando una cultura de prevención y resiliencia frente a los desastres naturales.



LITERATURA CITADA

- Alexander, D. E. (2013). Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey. *Natural hazards and earth system sciences*, 13(11), 2707-2716.
- Almaguer Carmenates, Y. (2005). Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda (Doctoral dissertation, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas).
- Akgun, A. (2012). A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. *Landslides*, 9(1), 93-106.
- Ayala-Carcedo, F. J., & Corominas, J. (2003). *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España* (N°4 ed.). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. **Geomorphology**, 65(1-2), 15-31.
- Barredo, J. I., & Bosque-Sendra, J. (1998). Multi-criteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. *Geographical Systems*, 5, 313-328.
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). **Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach**. Springer Science & Business Media.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (2004). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters* (2nd ed.). Routledge.
- Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., ... & Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural hazards*, 67, 193-211.
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A preference ranking organization method: (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making). **Management Science**, 31(6), 647-656.
- Busayo, E. T., Kalumba, A. M., Afuye, G. A., Ekundayo, O. Y., & Orimoloye, I. R. (2020). Assessment of the Sendai framework for disaster risk reduction studies since 2015. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101906.
- Calvello, M., d'Orsi, R. N., Piciullo, L., Paes, N., Magalhaes, M., & Lacerda, W. A. (2015). The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: analysis of performance for the years 2010–2013. *International journal of disaster risk reduction*, 12, 3-15.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., ... & Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1/2), 57-72.
- Carrara, A., & Guzzetti, F. (Eds.). (2013). *Geographical information systems in assessing natural hazards* (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
- Carrara, A. M. (1976). Landslide inventory in northern Calabria, southern Italy. *. Geological Society of America Bulletin*, 1153-1162.
- CENAPRED. (2006). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. Ciudad de México.



- CENAPRED. (2014). *Diagnóstico de peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*.
- CEPAL, N. (2014). Manual para la Evaluación de Desastres.
- Chen, L., Zhang, X., & Li, Y. (2019). "A review of machine learning for decision making under uncertainty." *Natural Hazards*, 95(1), 1-20.
- Chen, W., Zhang, S., & Li, X. (2021). Application of AHP and artificial intelligence in landslide susceptibility mapping. *Journal of Natural Hazards*, Springer.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2013). *Bases fisiográficas – Biodiversidad Mexicana*. Incompleta
- Coordinación Nacional de Protección Civil, CENAPRED. (2015). *Generación de Insumos para el Atlas Nacional de Riesgos, Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas*. México.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2012). Social vulnerability to environmental hazards. In *Hazards vulnerability and environmental justice* (pp. 143-160).
- Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. (1991). *Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños*.
- Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. (1991). *Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños*.
- Fuchs, S., Heiss, K., & Hübl, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(5), 495-506.
- García-Rodríguez, M. J., Malpica, J. A., Benito, B., & Díaz, M. (2008). Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology*, 95(3-4), 172-191.
- Glade, T. (2005). Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. *Geomorphology*, 66(1-4), 189-213.
- González Huesca, A. E., Domínguez Morales, L., & Castañeda Martínez, A. (febrero de 2015). *Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas*.
- Greco, S., Figueira, J., & Ehrgott, M. (2016). *Multiple criteria decision analysis (Vol. 37)*. New York: springer.
- Greiving, S., Fleischhauer, M., & Wanczura, S. (2015). *Prioritization of flood mitigation measures using multi-criteria decision analysis*. Springer.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66.
- Herrera, C. S. (2022). Regionalización de los deslizamientos en México. Academia de Ingeniería. En *Regionalización de los deslizamientos en México. Academia de Ingeniería* (pág. 22).
- Hong, H., & Chen, W. (2019). Landslide susceptibility assessment using machine learning models and GIS-based AHP. *Environmental Research*, Elsevier.
- Hong, H., Pradhan, B., Jebur, M. N., Bui, D. T., Xu, C., & Akgun, A. (2016). Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-14.



- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer.
- Jensen, J. R. (2020). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson.
- Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., & Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural Hazards*, 64(2), 1925-1958.
- Keller, E. A. (2001). *Riesgos Naturales: Procesos de la Tierra como Riesgos, Desastres y Catástrofes*.
- Kreibich, H., Müller, M., Schröter, K., & Thieken, A. H. (2017). New insights into flood warning reception and emergency response by affected parties. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(12), 2075-2092.
- Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33-41.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2019). *Geographic Information Systems and Science*. Wiley
- Marin, V., Bertin, S., & Ferrara, F. (2017). Application of multi-criteria decision analysis for emergency response planning in earthquake scenarios. *Natural Hazards*, 89(3), 1231-1250.
- Martha, T. R., Kerle, N., Jetten, V., van Westen, C. J., & Kumar, K. V. (2010). Characterizing spectral, spatial, and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods. *Geomorphology*, 116(1-2), 24-36.
- Mendoza López, M., Domínguez Morales, L., Noriega Rioja, I., & Guevara Ortiz, E. (diciembre de 2002). *Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento*. (V. Ramos Radilla, Ed.)
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D. T., ... & Abderrahmane, B. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, 207, 103225.
- Moeinizada, S., Khakzad, N., & Reniers, G. (2020). Integrating machine learning into AHP for multi-criteria decision-making. *Natural Hazards*, Springer.
- Mondini, A. C., Guzzetti, F., Chang, K. T., Monserrat, O., Martha, T. R., & Manconi, A. (2021). Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 216, 103574.
- Murck, B. W., Skinner, B. J., & Porter, S. (1996). *Environmental geology*.
- 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.
- Pradhan, B., & Lee, S. (2022). Spatial prediction of landslide hazards using GIS-based multicriteria decision analysis techniques. *Environmental Earth Sciences*, Springer.



- Potter, S. H., Becker, J. S., Johnston, D. M., & Rossiter, K. P. (2015). An overview of the impacts of the 2010-2011 Canterbury earthquakes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 6-14.
- Rahman, M. M., & Szabó, G. (2022). Sustainable urban land-use optimization using GIS-based multicriteria decision-making (GIS-MCDM) approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(5), 313.
- Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Ardizzone, F. (2005). Geomorphological mapping to assess landslide risk: Concepts, methods and applications in the Umbria region of central Italy. *Landslide hazard and risk*, 429-468.
- Romano, G., Dal Sasso, P., Liuzzi, G. T., & Gentile, F. (2015). Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land use policy*, 48, 131-143.
- Roy, B. (2013). *Multicriteria methodology for decision aiding (Vol. 12)*. Springer Science & Business Media.
- Saaty, T. L. (1994). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory*.
- Saaty, T. L. (2008). "Decision making with the analytic hierarchy process."
- Saaty, T. L. (2016). The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, 363-419.
- Sandoval, V., Voss, M., Flörchinger, V., Lorenz, S., & Jafari, P. (2023). Integrated disaster risk management (IDRM): elements to advance its study and assessment. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(3), 343-356.
- Sassa, K., Canuti, P., & Yin, Y. (Eds.). (2014). *Landslide Science for a Safer Geoenvironment: Volume 3: Targeted Landslides*. Springer.
- Steele, K., Carmel, Y., Cross, J., & Wilcox, C. (2009). Uses and misuses of multicriteria decision analysis (MCDA) in environmental decision making. *Risk Analysis: An International Journal*, 29(1), 26-33.
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., & Revhaug, I. (2019). Landslide susceptibility assessment in vietnam using support vector machines, decision tree, and Naive Bayes Models. *Mathematical problems in Engineering*, 974638.
- UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). 2022. Disaster risk management. UNDRR terminology. <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk-management>.
- UNISDR, (2017) United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Report of the openended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction.
- 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.
- Vargas C, R. (2020). *Amenazas geológicas del departamento del Huila*
- Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, 24, 20-47.



- Wang, Y., Wu, H., & Chen, X. (2021). A novel hybrid AHP-AI approach for landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Springer.
- Xu, F., Van Westen, C. J., Xu, Q., Gorum, T., & Dai, F. (2012). Analysis of landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 57, 25-37.
- Zhang, X., Chen, L., & Li, Y. (2020). "Artificial intelligence in decision making: A review." *Natural Hazards*, 103(1), 1-25.
- Zhang, L., Wang, J., & Liu, Y. (2020). Land use suitability analysis using GIS and remote sensing: A case study in the Pearl River Delta. *Land Use Policy*, 94, 104-115.
- Zhao, C., & Lu, Z. (2018). Remote sensing of landslides—a review. *Remote Sens* 10 (2): 279.