

Innovación tecnológica en la interpretación de riesgos naturales: aplicación de productos fotogramétricos digitales

Inovação tecnológica na interpretação de ameaças naturais:
aplicação de produtos fotogramétricos digitais

Technological innovation in the interpretation of natural hazards:
application of digital photogrammetric products

Alexander Vergara¹, Dustin Tahisin Gómez-Rodríguez² y Ehyder Mario Barbosa Pérez³

¹ Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", Centro de Investigaciones de Información Geográfica (CIAF)

² Universitaria Agustiniana, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas

³ Corporación Universitaria Minuto de Dios, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas
Bogotá, Colombia

laalexvergara@gmail.com; dustin.tgr@gmail.com; e.barbosa01@gmail.com

Vergara: <https://orcid.org/0000-0002-2910-6760>

Gómez: <https://orcid.org/0000-0001-5359-2300>

Barbosa: <https://orcid.org/0000-0001-5105-4496>

Resumen

En respuesta a la necesidad de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), Colombia, de estimar y desarrollar cartografía temática para riesgos de inundaciones y deslizamientos a escala 1:25,000, se elaboró una propuesta metodológica para la transición de procesos interpretativos analógicos a digitales. Esta iniciativa ha producido resultados que han permitido interpretaciones más ágiles y confiables en comparación con las técnicas tradicionales, alineándose con los avances en tecnología geoespacial. La propuesta incorporó el uso de productos fotogramétricos digitales como ortofotomosaicos, modelos digitales de terreno (DTM), visualización 3D a través de software especializado y anaglifo. Estos recursos no solo han mejorado significativamente el proceso interpretativo, sino que también han apoyado la validación mediante visitas de campo. Esta actividad ha sido optimizada utilizando tabletas y aplicaciones geoespaciales accesibles, mejorando notablemente la calidad de la información generada.

PALABRAS CLAVE: anaglifo; geomorfología; modelos digitales de elevación (MDE); morfometría; deslizamientos de tierra; ortofotomosaicos.

Resumo

Em resposta à necessidade da Corporação Autônoma Regional do Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), Colômbia, de estimar e desenvolver cartografia temática para riscos de inundações e deslizamentos em escala 1:25.000, foi elaborada uma proposta metodológica para a transição de processos interpretativos analógicos para digitais. Essa iniciativa gerou resultados que possibilitam interpretações mais ágeis e confiáveis em comparação com as técnicas tradicionais, alinhando-se aos avanços da tecnologia geoespacial. A proposta incorporou o uso de produtos fotogramétricos digitais, como ortofotomosaicos, modelos digitais de terreno (MDT), visualização 3D através de softwares especializados e anáglifos. Esses recursos não apenas melhoraram significativamente o processo interpretativo, mas também apoiaram a validação por meio de visitas de campo. Essa atividade foi otimizada com o uso de tablets e aplicativos geoespaciais acessíveis, melhorando significativamente a qualidade das informações geradas.

PALAVRAS-CHAVE: anaglifo; geomorfologia; modelos digitais de elevação (MDE); morfometria; deslizamentos de terra; ortofotomosaicos.

Abstract

In response to the need of the Regional Autonomous Corporation of the Center of Antioquia (CORANTIOQUIA), Colombia, to estimate and develop thematic cartography for flood and landslide risks at a 1:25,000 scale, a methodological proposal was developed to transition from analog to digital interpretative processes. This initiative has yielded results that enable faster and more reliable interpretations compared to traditional techniques, aligning with advancements in geospatial technology. The proposal incorporated the use of digital photogrammetric products such as orthophotomosaic, digital terrain models (DTMs), 3D visualization through specialized software, and anaglyphs. These resources have significantly improved the interpretative process and supported validation through field visits. This activity has been further optimized by using tablets and accessible geospatial applications, significantly enhancing the quality of the information generated.

KEYWORDS: anaglyph; geomorphology; digital elevation models (DEM); morphometry; landslides; orthophotomosaic.

1. Introducción

La gestión de riesgos naturales es un desafío crítico en muchas regiones del mundo, especialmente en áreas propensas a fenómenos como inundaciones y deslizamientos de tierra. En Colombia, la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) enfrenta la necesidad urgente de desarrollar herramientas efectivas para la identificación y mitigación de estos riesgos, dado el impacto significativo que tienen en la seguridad y el bienestar de las comunidades locales (Kakavas y Nikolakopoulos, 2021; Quintero *et al.*, 2018; Mendivelso, 2008; Farr *et al.*, 2007).

En este contexto, el presente estudio se propuso identificar la necesidad de estimar y desarrollar cartografía temática para riesgos de inundaciones y deslizamientos a una escala de 1:25.000. La metodología propuesta busca facilitar la transición de procesos interpretativos analógicos a digitales, aprovechando los avances en tecnologías geoespaciales. La incorporación de productos fotogramétricos digitales, como ortofotomosaicos, modelos digitales de terreno (DTM) y visualización 3D, representa un avance significativo en la capacidad de análisis y representación de la información geográfica (Grohmann, 2018; Carvajal, 2012; Florinsky, 2016; Penna *et al.*, 2014).

La utilización de estas herramientas no solo mejora la precisión y la calidad de la información, sino que también permite una interpretación más ágil y confiable de los datos. Esto es fundamental para la elaboración de mapas que reflejen de manera precisa la vulnerabilidad de las áreas afectadas y los factores que contribuyen a la ocurrencia de desastres naturales. En efecto, la integración de tecnologías como tabletas y aplicaciones geoespaciales accesibles optimiza el proceso de validación de la información a través de visitas de campo, lo que resulta en una mayor calidad de los datos recopilados (Benito, 2008; Coelho y Nunes, 2007).

Este estudio no solo busca generar cartografía temática, sino también contribuir a la sensibilización de las comunidades sobre los

riesgos que enfrentan y fomentar una cultura de prevención. Al proporcionar a las autoridades locales y a los planificadores territoriales herramientas efectivas para la toma de decisiones, se espera que se logren avances significativos en la gestión de riesgos y en la planificación territorial en la región (Carvajal, 2012; Di Girolamo, 2008; Lerma, 2002).

En consecuencia, la investigación se enmarca en un contexto de creciente necesidad de innovación tecnológica en la interpretación de amenazas naturales, con el objetivo de mejorar la capacidad de respuesta ante desastres y promover un desarrollo sostenible en CORANTIOQUIA. A través de la implementación de la metodología propuesta, se espera no solo identificar los desafíos actuales, sino también sentar las bases para futuras investigaciones y acciones en la gestión de riesgos en la región.

2. Área de estudio

El área para la cual se desarrolló la cartografía temática de riesgos de inundación y movimientos en masa corresponde a la zona norte de la jurisdicción de CORANTIOQUIA (FIGURA 1). Esto incluye los municipios de Caucaasia, Nechí, Tarazá, Cáceres, El Bagre, Angostura, Yarumal, Amalfi, Zaragoza, Valdivia, Anorí, Segovia, Campamento, Briceño y Guadalupe, pertenecientes a la cuenca baja de los ríos Cauca y Nechí. El área total de cobertura es de 1.500.000 hectáreas, equivalentes a 100 hojas a escala 1:25.000 (Cheng *et al.*, 2018; CORANTIOQUIA, 2016-2019; Moore *et al.*, 1991).

3. Metodología y métodos

Para la estimación y desarrollo de cartografía temática para riesgos de inundaciones y deslizamientos en el área de estudio (FIGURA 1), se implementó una metodología que combina técnicas avanzadas de fotogrametría digital con un enfoque sistemático de análisis geoespacial. Esta metodología se estructuró en varias etapas clave, cada una diseñada para maximizar la precisión y la utilidad de los datos obtenidos.

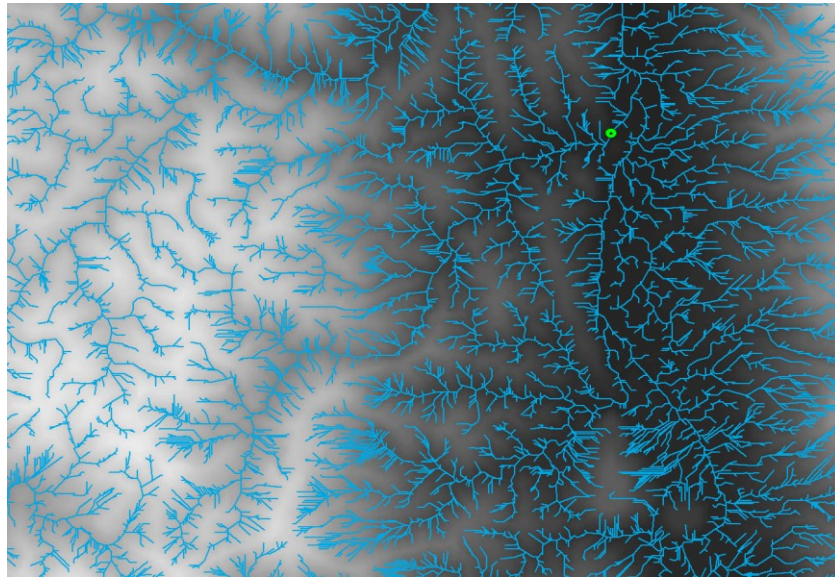


FIGURA 2. Despliegue de la red de drenaje utilizando la caja de herramientas de hidrología de *ArcMap* 10.
Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2013



FIGURA 3. Transición de ráster de elevación a ráster de dirección de flujo. Fuente: ESRI, 2014

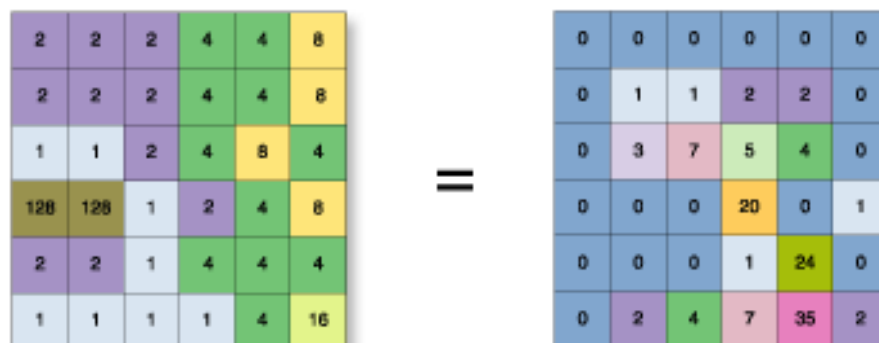


FIGURA 4. Transición de un ráster de dirección de flujo a un ráster de acumulación de flujo. Fuente: ESRI, 2014

Asimismo, para corroborar la información obtenida a través de los métodos digitales, se llevaron a cabo visitas de campo. Durante estas visitas, se realizaron observaciones directas y se recolectaron datos adicionales sobre las condiciones del terreno, la morfología y los

procesos geológicos presentes. El uso de dispositivos móviles y aplicaciones geoespaciales facilitó la captura de datos en tiempo real, mejorando la calidad y la precisión de la información recopilada (FIGURAS 5, 6 y 7), (Gesch, 2018;).

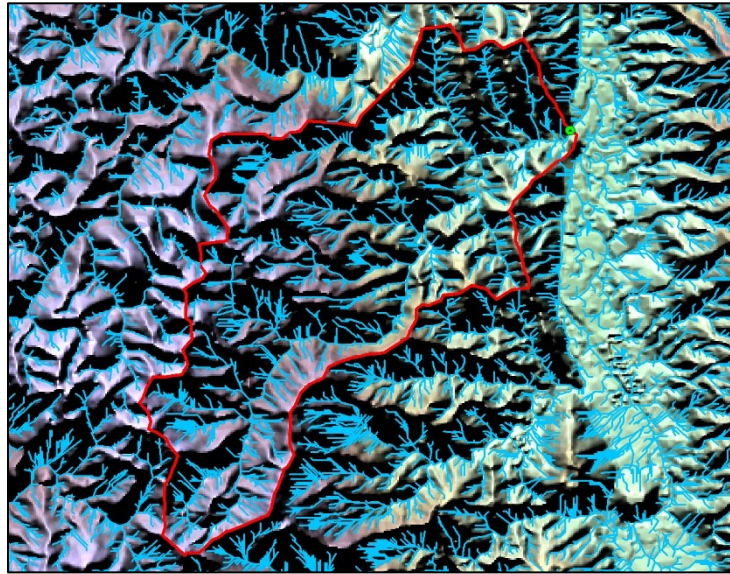


FIGURA 5. DTM con sombreado y la subcuenca determinada utilizando la caja de herramientas Hidrología en ArcMap 10.x. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2013

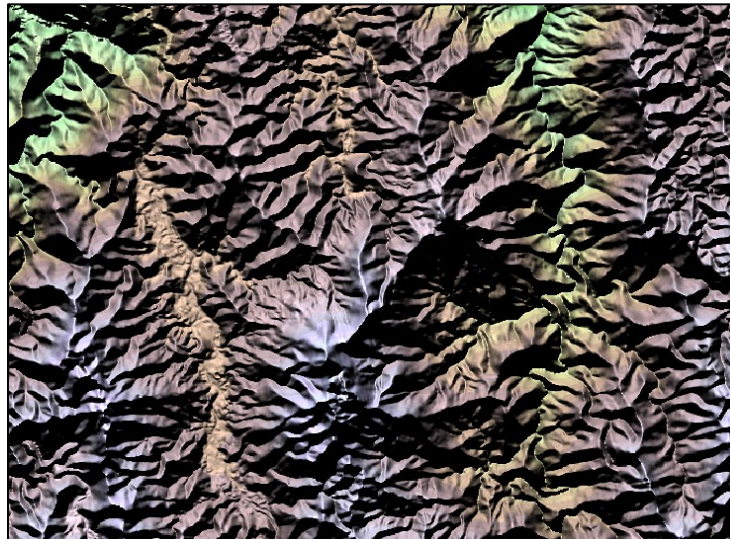


FIGURA 6. Modelos de sombra e hipsométricos derivados del DEM. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2013

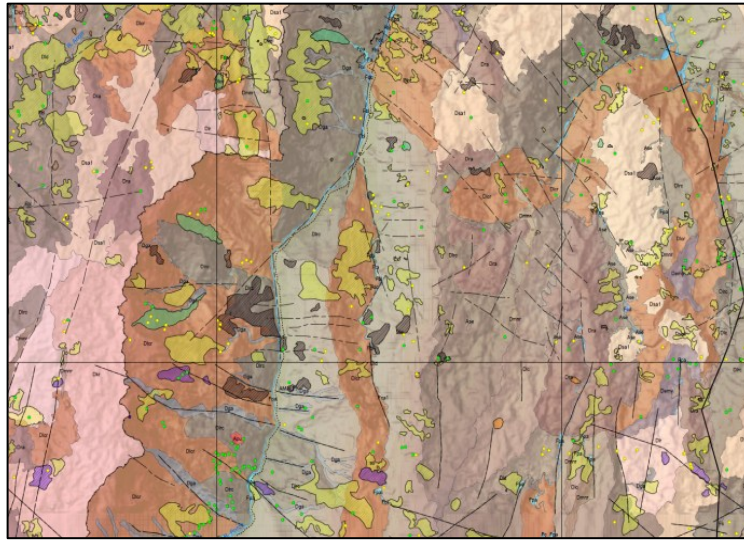


FIGURA 7. Cartografía geomorfológica generada a partir de la DTM. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2013

Finalmente, se elaboraron mapas temáticos que representan los riesgos de inundaciones y deslizamientos en la región. Estos mapas no solo sirven como herramientas de referencia para la gestión de riesgos, sino que también son

recursos valiosos para la planificación territorial y la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades locales (FIGURAS 8 y 9), (Kakavas y Nikolakopoulos, 2021; García *et al.*, 2018; Grohmann, 2018).



FIGURA 8. Reconocimiento de un evento de eliminación masiva en ortofotomosaico. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2013

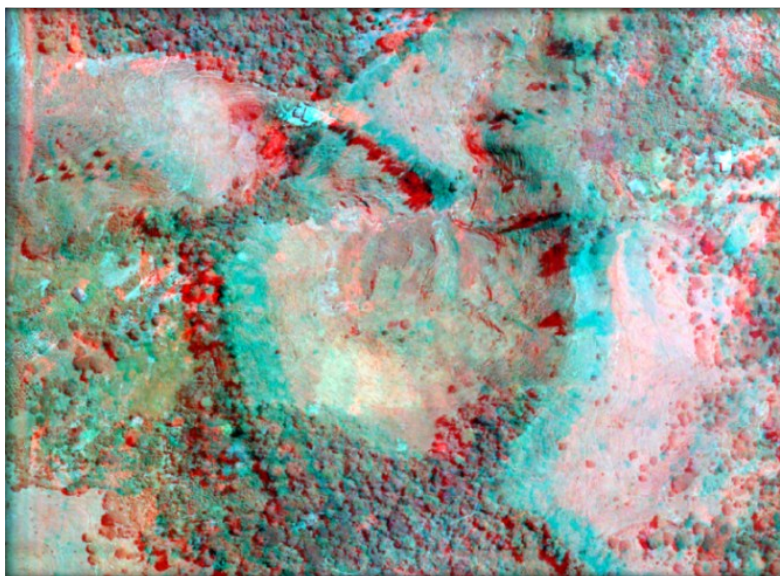


FIGURA 9. Reconocimiento de un evento de eliminación masiva en la imagen anaglífica. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2013

Esta metodología integral no solo optimiza el proceso de generación de cartografía temática, sino que también establece un marco para la aplicación de tecnologías geoespaciales en la gestión de desastres, contribuyendo a la resiliencia de las comunidades en CORANTIOQUIA.

3.1 Zonas prioritarias

Las zonas prioritarias en cuanto a la ocurrencia de movimientos en masa y fenómenos de inundación correspondieron a los municipios de Caucasia, Nechí, El Bagre y Zaragoza.

3.2 Datos, software y equipos utilizados

Dado que este documento tiene como objetivo demostrar la aplicabilidad de productos fotogramétricos y técnicas dedicadas a procesos como la interpretación geomorfológica, el movimiento de masas, la morfometría y el modelado hidráulico, entre otros, solo se citan materiales y métodos de esta naturaleza. Adicionalmente, diversos insumos complementan los procesos de generación cartográfica para los temas abordados.

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron los siguientes datos:

- ✓ Fotografías aéreas digitales del sensor IGAC *Vexcel Ultracam D* con 0,3 metros de resolución espacial.
- ✓ Archivos de aerotriangulación.
- ✓ Modelos Digitales del Terreno en formato vectorial CAD (Diseño Asistido por Ordenador) a escala 1:10.000.

El software utilizado para el proyecto incluyó:

- ✓ *Erdas Imagine 2011*: Una suite de fotogrametría que incluye *Lps*, *Stereo Analyst* y *ErMapper* para el procesamiento digital de imágenes.
- ✓ *CAD MicroStation Pro600*: Se utiliza para procesos de restitución fotogramétrica.
- ✓ *ArcGIS-ArcMap 10.x*: Para capturar y almacenar información interpretada en bases de datos espaciales.
- ✓ *Avenza PDF Maps*: Se utiliza para actividades de control de campo.

Además, los equipos de visualización estereoscópica, procesamiento de datos y almacenamiento de información comprendieron estaciones fotogramétricas equipadas con sistemas *RealD*, sistemas *Z-Screen*, gafas polarizadas pasivas y estaciones de trabajo de

rango medio o computadoras con capacidades de procesamiento múltiple.

4. Resultados

4.1. Delimitación de cuencas hidrológicas

La delimitación de las cuencas hidrológicas se llevó a cabo a través de una serie de actividades metódicas:

4.1.1 Estudio de la zona aportadora

Esta fase comenzó con la generación de un ráster que representaba la dirección del flujo, utilizando la herramienta Dirección de flujo de la extensión *Spatial Analyst* en *ArcMap*. La incorporación de ubicaciones para entidades que faciliten la determinación del área de la cuenca, como las estaciones hidrometeorológicas fue un paso posterior.

4.1.2 Análisis y determinación de redes de drenaje

Aunque existe la disponibilidad de redes de drenaje en formato vectorial como líneas de corte, los procesos requirieron la aplicación de herramientas SIG, en particular la extensión *Spatial Analyst* en *ArcMap 10*. Este requerimiento se deriva de la necesidad crítica de realizar la caracterización hidrológica del modelo de superficie, que depende del análisis de la dirección del flujo hacia y desde cada celda (Florinsky, 2016).

La integración de estas herramientas y metodologías permitió una comprensión integral de la dinámica hidrológica dentro del área de estudio, lo que en última instancia mejoró la precisión de las evaluaciones de riesgo de inundación y el modelado de los procesos de transporte de agua y sedimentos (Gesch, 2018; García *et al.*, 2018).

4.1.3 Delimitación de cuencas: análisis de acumulación de caudales

Otro paso en la delimitación de las cuencas fue el análisis de la acumulación de caudales. Para ello, se obtuvo un ráster en el que las celdas con caudal concentrado permitieron la identificación de canales y arroyos. Las celdas con valores superiores a cero indicaban la presencia de

acumulación de flujo, mientras que las celdas con un valor almacenado de cero representaban puntos de elevación más altos y ayudaban a identificar las divisiones de las cuencas hidrográficas (Kakavas y Nikolakopoulos, 2021).

4.1.4 Delimitación de cuencas

Finalmente, para la delimitación de la cuenca, se deben considerar los puntos de salida conocidos. Con el apoyo de productos anteriores, estos puntos generaron automáticamente el ráster para la cuenca de estudio base. Los algoritmos de procesamiento para dicha zonificación son generalmente similares tanto en el software propietario como en el de código abierto. En este caso, se utilizaron *Arc Hydro* de *ArcGIS* e *Hydrology* de *ArcMap* versión 10.x, empleándose específicamente la herramienta *Watershed* en esta última. Del mismo modo, la delimitación de la cuenca hidrológica se basa en la suma de ciertas variables. Dada la naturaleza y precisión de los datos, y la correcta aplicación de los procesos mínimos requeridos, esto facilita la obtención de resultados fiables. El interés estadístico en esto como base para los procedimientos de modelación hidráulica dirigidos a la predicción debería resultar en valores de baja incertidumbre (Ishtiaque y Rahman, 2020; González y Viveen, 2020).

4.2 Generación cartográfica y condicionantes del terreno

La generación cartográfica para el análisis de los factores condicionantes del terreno ha mejorado considerablemente con la adopción del Modelo Digital del Terreno (MDT), el cual ha facilitado diversas actividades vinculadas a los estudios geoespaciales. Siguiendo las directrices metodológicas establecidas por el ITC en 1992, se procedió inicialmente a la elaboración de un mapa geomorfológico, apoyado por cartografía geológica y geomorfológica temática, así como por técnicas avanzadas de interpretación estereoscópica y procesamiento digital de imágenes ópticas y multispectrales.

Tradicionalmente, la obtención de parámetros morfométricos, tales como pendiente, orientación y curvaturas (verticales y

horizontales), se basaba en el uso de cartografía básica, fotografías aéreas analógicas y herramientas óptico-mecánicas, como estereoscopios de espejo y barras de paralaje. Con el tiempo, se incorporaron productos derivados de tecnologías más avanzadas como el *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), con una resolución de 30 metros. No obstante, la disponibilidad de MDTs más precisos, en combinación con los avances en las tecnologías de información geográfica, ha enriquecido significativamente los proyectos cartográficos, mejorando la precisión de los productos fotogramétricos (González y Viveen, 2020).

Aunque en muchos casos los procesos de cartografía temática ambiental no enfatizan la alta precisión espacial, la incorporación de fuentes de datos de alta calidad, ya sea por la escala final o por los atributos inherentes a los datos, ha incrementado la fiabilidad de los productos resultantes. El Modelo Digital de Elevación (DEM) se ha convertido en un recurso clave, no solo por su mayor resolución espacial, sino también por superar los requerimientos mínimos de adquisición en términos de precisión (Boulton y Stokes, 2018; Di Girolamo, 2008).

4.2.1 DTM como entrada para el análisis y generación de cartografía geomorfológica

Para la interpretación de las unidades geomorfológicas que sustentan el mapa de peligrosidad, se empleó el DTM fotogramétrico. A partir de este DTM se generaron modelos de sombras y tintes hipsométricos, lo que hizo más claro el proceso deductivo del terreno en cuanto a la delimitación de las formas del terreno. Los usuarios de estos productos han descubierto que la iluminación oblicua, que brilla desde un ángulo moderado entre el horizonte y el cenit, y desde el noroeste, proporciona imágenes más intuitivas de la forma del terreno (Florinsky, 2016; Kennelly, 2008). Los modelos de sombra ofrecen una clara ventaja para la interpretación geomorfológica.

4.2.2 Análisis y generación de cartografía de peligro de deslizamiento mediante ortofotomosaicos, DTM, anaglifos y estaciones fotogramétricas

La generación de cartografía en estudios geoespaciales, especialmente en el análisis de deslizamientos de tierra, implica el uso de productos fotogramétricos como herramienta fundamental. Sin embargo, la evaluación y consolidación de la información existente en bases de datos robustas es igualmente esencial para alcanzar los objetivos de las misiones corporativas. En la creación de mapas de densidad de procesos de deslizamiento, factores condicionantes y susceptibilidad del terreno, el Modelo Digital del Terreno (DTM) juega un papel clave. No obstante, la interpretación estereoscópica se vuelve crucial para la identificación precisa de deslizamientos de tierra, incluyendo distintas formas y zonas de susceptibilidad. Los productos fotogramétricos digitales derivados que se emplean incluyen modelos digitales de sombras, hipsométricos, ortofotos, ortofotomosaicos y anaglifos, apoyados por estaciones fotogramétricas, lo que permite una mayor precisión en los resultados (González y Viveen, 2020; Grohmann, 2018).

Para la creación de mapas de densidad de deslizamientos, además de los datos históricos proporcionados por instituciones como CORANTIOQUIA, DAPARD, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el IDEAM y el INVÍAS, es fundamental la interpretación de productos como ortofotos, ortofotomosaicos y anaglifos a través de estaciones fotogramétricas. Estos productos aprovechan las ventajas de la estereoscopia para un análisis más detallado. Entre los beneficios del uso combinado del DTM, ortofotomosaicos y anaglifos en estas tareas se destacan la posibilidad de cargar y procesar en cualquier software GIS, una referencia espacial definitiva dentro del bloque fotogramétrico, la capacidad de visualización 3D sin necesidad de estaciones fotogramétricas, y la generación de escenarios completos a escalas como 1:25.000.

Sin olvidar, que los procesos de control de calidad, verificación y validación también se optimizan mediante el uso de estos insumos fotogramétricos, basándose en las definiciones clásicas de deslizamientos de Van Zuidam (1985) y Varnes (1978), lo que refuerza la precisión de los estudios realizados.

4.3 Metodología para la interpretación

El proceso de interpretación se llevó a cabo utilizando las herramientas de captura y digitalización proporcionadas por el software *ArcMap* de ArcGIS y *Stereo Analyst* de Erdas. Para el primero, se utilizó el ortofotomosaico, y el requisito de visualización estereoscópica se cumplió con el anaglifo del mismo producto. Ambos conjuntos de datos se proporcionaron en un formato de mapa a escala 1:25.000, lo que permitió a los intérpretes lograr un mayor rendimiento y una visión general completa. En este último caso, el trabajo se llevó a cabo en un entorno puramente estereoscópico utilizando

bloques fotogramétricos ajustados. Ambos enfoques permitieron el almacenamiento directo en una Geodatabase (GDB), una base de datos espacial específica del software ArcGIS, que se creó previamente a partir de la clasificación de eventos de movimiento en masa a partir de registros históricos de la zona (Ishtiaque y Rahman, 2020).

Dado que la interpretación y la digitalización se realizaron directamente en el GDB, los atributos de los eventos identificados se registraron simultáneamente durante el proceso de interpretación, como se muestra en la TABLA 1.

TABLA 1. Clasificación de movimientos y atributos mínimos según la definición del BGF. Fuente: Proyecto IGAC-CORANTIOQUIA, 2023

TIPO	CODIGO	ESTADO	FECHA	SENSOR REMOTO	SITIO	CLASIFICACION	GRADO	DESCRIPCION
TIPO		Se capturaran cinco tipos <i>Deslizamientos traslacional, Deslizamiento rotacional, Flujo, Reptación, Terracetas-Pata de Vaca.</i>						
CODIGO		Corresponde al código asignado al tipo de evento que para el siguiente caso es						
		<i>Flujo</i>		Dfl				
		<i>Deslizamiento Rotacional</i>		Ddr				
		<i>Deslizamiento Traslacional</i>		Ddp				
		<i>Reptación</i>		Dsf				
		<i>Terracetas-pata de vaca</i>		Dtz				
ESTADO		INACTIVO/ ACTIVO		ACTIVO: SUELO DESNUDO				
				INACTIVO: SI EL EVENTO SE ENCUENTRA CUBIERTO				
FECHA: SENSOR REMOTO		Corresponde a la fecha del sensor de captura del evento.						
SITIO		Imagen a partir de la cual ha sido capturada el evento						
		Corresponde a ciertas características del lugar donde se presente el evento que para el siguiente caso se manejaran de tres tipos						
		Urbano						
		Rural						
CLASIFICACION		Vial						
		Serán de dos tipos : Movimiento en masa y erosión						
GRADO		Corresponde a una calificación dada a los procesos clasificados como terracetas-pata de vaca-reptación los cuales son: () ligera, () moderada, () severa.						
DESCRIPCION		Se realizara en el siguiente orden: (característica identificada en la interpretación. Ejemplo golpe de cuchara , seguida de alguna observación que se considere relevante dentro del evento capturado)						

En el ámbito de la geomática y el análisis geoespacial, la precisión y eficiencia son esenciales para la correcta interpretación de los datos. La integración y digitalización de datos geoespaciales directamente en una base de datos geográfica (GDB) optimiza el flujo de trabajo, garantizando una mayor fiabilidad y consistencia en los datos registrados. Este enfoque sigue las mejores prácticas en la gestión de datos espaciales, donde la asignación de atributos en tiempo real durante la fase de

interpretación es crítica para mantener la integridad de la información (Kennelly, 2008).

Kennelly (2008) destaca que el uso de modelos de relieve sombreado y tintes hipsométricos derivados de Modelos Digitales de Elevación (DEM) contribuye a una comprensión más intuitiva de la morfología del terreno, permitiendo una delimitación más precisa de las unidades geomorfológicas. Cuando se combinan con técnicas de visualización estereoscópica, como las proporcionadas por herramientas como *Stereo Analyst*, se posibilita un análisis exhaustivo

de las características del relieve y de eventos de movimiento en masa. La integración de ortofotomosaicos con anaglifos estereoscópicos en sistemas como ArcMap permite una mayor productividad y una visión más completa del paisaje. Además, la capacidad de almacenar datos en una GDB garantiza que los atributos detectados se registren de manera meticulosa, creando una base de datos espacial robusta para futuros análisis y toma de decisiones (Ishtiaque y Rahman, 2020; Boulton y Stokes, 2018).

La evolución de los criterios de interpretación visual, que surgieron con el uso de fotografía analógica, sigue siendo aplicable a imágenes satelitales y productos fotogramétricos digitales. Elementos como la textura, estructura y disposición espacial son fundamentales en la interpretación de datos geoespaciales, permitiendo distinguir accidentes geográficos y evaluar características geomorfológicas críticas para el monitoreo ambiental y la evaluación de riesgos (González y Viveen, 2020; Kennelly, 2008).

La interpretación visual es un proceso subjetivo que se beneficia de criterios estandarizados para mejorar la precisión y coherencia. La textura se refiere a los cambios tonales en una imagen que indican rugosidad o patrones de vegetación, mientras que la estructura se centra en la disposición geométrica de los objetos, ayudando a identificar características naturales y artificiales. La disposición espacial, o la relación posicional entre los objetos, proporciona un contexto fundamental para entender las interrelaciones dentro del paisaje (Lillesand *et al.*, 2015).

El uso de datos de alta resolución, como el ortofotomosaico con un valor GSD de 0,30 m, facilita la interpretación precisa de eventos de movimiento en masa. La combinación de ortofotomosaicos y visualización estereoscópica, ya sea a través de estaciones fotogramétricas o anaglifos generados a partir del DTM, refuerza la clasificación y comprensión de estos eventos, permitiendo un análisis detallado y fiable (Kakavas y Nikolakopoulos, 2021; Geng *et al.*, 2018). Estos avances en la teledetección y fotogrametría ofrecen una base sólida para la interpretación precisa y la toma de decisiones

geoespaciales (Lillesand *et al.*, 2015; Farr *et al.*, 2007)

En la FIGURA 9, la aplicación de la visión monoscópica al ortofotomosaico permite identificar el evento geológico mediante la detección de contrastes en la cobertura del terreno circundante. Aunque las sombras no se consideran un criterio primario, aportan información relevante para la delineación de movimientos de masa, contribuyendo a una mejor interpretación de estos fenómenos. Adicionalmente, la imagen anaglífica, al activar la estereoscopia, facilita la clasificación detallada del evento en una base de datos espacial preexistente.

El uso de la visión monoscópica en ortofotomosaicos es crucial para la identificación y análisis de eventos de movimiento en masa, ya que esta técnica permite detectar variaciones en la cobertura del terreno, facilitando el reconocimiento de diferentes tipos de formaciones geológicas. A pesar de que las sombras no son el criterio fundamental en este proceso, su aporte es significativo para delinear con mayor precisión los movimientos de masa. Esta metodología es esencial para generar representaciones cartográficas detalladas y fiables de los peligros geológicos, proporcionando una herramienta clave en el análisis de riesgos y en la planificación geoespacial (Ramírez, 2020; Lillesand *et al.*, 2015).

La creación de mapas de densidad para los procesos de movimiento en masa es una herramienta clave para la comprensión y gestión de áreas de riesgo geológico. Estos mapas no solo permiten modelar y validar amenazas geoespaciales, sino que también son fundamentales para la planificación y gestión sostenible de las áreas afectadas, lo cual impacta positivamente la calidad de vida de las comunidades. En este contexto, la metodología aplicada al desarrollo del proyecto integra tanto los insumos como los procesos propuestos, garantizando una evaluación robusta del entorno (FIGURA 9).

La implementación de nuevas técnicas ha optimizado el trabajo de profesionales como intérpretes, hidrólogos, geólogos y analistas,

reduciendo significativamente costos, tiempos y procesos, sin comprometer la precisión. Estas mejoras han ampliado las aplicaciones y la utilidad de los mapas resultantes. Además, el análisis comparativo entre los métodos tradicionales analógicos y las técnicas digitales pone de manifiesto las ventajas de estas últimas, especialmente en términos de precisión, eficiencia y capacidad de integración con tecnologías de información geoespacial.

4.4 Ventajas de las entradas analógicas

El uso de entradas analógicas en proyectos similares al desarrollado tiene varias ventajas:

- ✓ Disponibilidad pública: las fotografías analógicas, la cartografía básica y temática son fácilmente accesibles para el público.
- ✓ Costos moderados: los insumos básicos son generalmente menos costosos.
- ✓ Amplio rango temporal: los datos analógicos abarcan desde 1935 hasta 2005, dependiendo de la región y el período de actividad del IGAC.
- ✓ Manejo físico: la gestión de la información física puede ser sencilla.
- ✓ Técnicas alternativas: las técnicas de mapeo que utilizan estos recursos siguen siendo una opción viable (Kakavas y Nikolakopoulos, 2021; Mendivelso, 2008).

Sin embargo, existen desventajas notables:

- ✓ Los procesos interpretativos requieren dispositivos como estereoscopios para su visualización.
- ✓ Las transferencias de interpretaciones a un mapa base requiere de equipos como el *Sketch master* o el *estereosketch*, que están quedando obsoletos.
- ✓ La precisión cartográfica final, debido a los instrumentos de transferencia, suele ser de aceptable a baja.
- ✓ Las interpretaciones deben ser digitalizadas para ser utilizadas en medios digitales y posteriormente generadas en una base de datos espacial.
- ✓ La creación de mapas de pendiente y orientación requiere mediciones físicas en cartografía básica, que pueden ser

engorrosas a pesar de la disponibilidad del SRTM DTM (Modelo Digital del Terreno).

- ✓ Limitadas imágenes anteriores a 2006, antes de que la cámara digital *Vexcel Ultraca-D* entrara en funcionamiento.
- ✓ Posible deterioro de las imágenes de contacto con el paso del tiempo.
- ✓ Trazar cartografía e imprimir fotografías puede ser costoso (Ramírez *et al.*, 2020; Lillesand *et al.*, 2015).

4.5 Ventajas de los productos fotogramétricos digitales

Los productos fotogramétricos digitales ofrecen varias ventajas interpretativas:

- ✓ Las actividades son semiautomáticas, aumentando la eficiencia.
- ✓ Es compatible con varios programas de información geográfica y herramientas de procesamiento digital de imágenes.
- ✓ Los productos cartográficos se fabrican a menor coste y en menos tiempo.
- ✓ Los algoritmos se pueden aplicar para obtener productos, operar y analizar diversas fuentes de entrada.
- ✓ El almacenamiento digital garantiza la conservación de los datos a lo largo del tiempo.

Verificación de campo: los dispositivos portátiles, como tabletas y ordenadores portátiles, permiten la verificación y validación sobre el terreno (Geng *et al.*, 2018; Lillesand *et al.*, 2015). Sin embargo, existen desventajas:

- ✓ El funcionamiento de varios programas puede requerir una amplia especialización.
- ✓ El software especializado puede ser costoso.
- ✓ Se requiere una gran capacidad de almacenamiento para imágenes en bruto y ortofotomosaicos.
- ✓ Los usuarios necesitan formación para utilizar eficazmente las herramientas de software.
- ✓ Son necesarios ajustes de bloques (triangulación aerodinámica), lo que conlleva costes elevados en función del número de imágenes.
- ✓ Procesamiento semiautomatizado de productos: productos como los DEM requieren una edición meticulosa para su uso.

en morfometría y modelos de simulación hidráulica (Ramírez *et al.*, 2020; Geng *et al.*, 2018; Lillesand *et al.*, 2015).

5. Discusión

El desarrollo e implementación de mapas de densidad para procesos de movimiento en masa es una herramienta crítica para realizar un análisis geológico y ambiental integral. Estos mapas son esenciales para el modelado y la validación de amenazas geológicas, lo que garantiza una mejor gestión del territorio y de las comunidades que habitan en áreas de riesgo. Al combinar tanto técnicas tradicionales como innovadoras, se logra un equilibrio que permite aprovechar lo mejor de cada enfoque, lo cual resulta crucial para la precisión y la eficiencia en la gestión de amenazas.

El avance hacia la adopción de entradas digitales ha permitido una mejora significativa en el manejo y análisis de datos, aportando precisión y versatilidad. Las técnicas digitales facilitan un mapeo más detallado y exacto, que es crucial para una evaluación y gestión más efectiva de los riesgos, lo que, a su vez, contribuye a la sostenibilidad ambiental y a la seguridad de las comunidades (González y Viveen, 2020; Geng *et al.*, 2018).

Aunque existen avances hacia las técnicas digitales es importante reconocer los procedimientos asociados a la información analógica, como aquellos necesarios para la verificación de campo tras la fase de fotointerpretación. El uso de equipos tradicionales, como el estereoscopio de bolsillo, la brújula y el altímetro, sigue siendo esencial en ciertas fases del proceso. Estas herramientas se complementan con la selección de fotografías representativas de áreas clave, tales como carreteras, autopistas y ríos, y la preparación de un equipo especializado para el trabajo de campo (Kakavas y Nikolakopoulos, 2021; Mendivelso, 2008).

En contraste, el uso de aplicaciones móviles como PDF Maps ha revolucionado los procedimientos de verificación y control de campo. Esta aplicación permite la carga y descarga de mapas en formato .pdf

georreferenciados, con acceso tanto en línea como fuera de línea, optimizando el proceso de mapeo. Además, el GPS integrado de los dispositivos móviles facilita el rastreo de ubicaciones en tiempo real, lo que mejora la precisión en la validación de datos (Florinsky, 2016; Di Girolamo, 2008).

Una de las ventajas más significativas de esta tecnología es la capacidad de registrar y actualizar bases de datos de campo mediante el uso de mapas, mosaicos y anaglifs interpretados. Al incorporar el uso de anteojos anaglifs de bajo costo, la estereoscopia puede aplicarse fácilmente en el campo, lo que permite identificar con precisión los atributos geoespaciales de los eventos analizados. Adicionalmente, las rutas de trabajo trazadas en formato .kmz, compatibles con software SIG, optimizan el flujo de trabajo y mejoran la conectividad entre las actividades de campo y la oficina (Grohmann, 2018).

El uso de herramientas digitales en las ciencias geográficas ha transformado los métodos tradicionales, facilitando la creación de productos cartográficos de alta precisión, como los ortofotomosaicos, DEM y anaglifs. En el marco de este proyecto se generaron 60 hojas cartográficas a escala 1:25.000, junto con 4.572 fotografías aéreas ajustadas a una escala 1:100.000, lo que contribuyó al control de calidad y validación de los productos. El entorno digital ha mostrado ser mucho más eficiente en comparación con los métodos analógicos, que requieren más tiempo debido a tareas engorrosas como el escaneo y la digitalización de datos (Grohmann, 2018; Farr *et al.*, 2007).

6. Conclusiones

La migración de procesos analógicos a digitales ha permitido una notable mejora en la precisión de los productos cartográficos. El uso de ortofotomosaicos y Modelos Digitales del Terreno (MDT) ha proporcionado una representación más detallada y confiable de las características geomorfológicas. Estas herramientas permiten un análisis espacial preciso de las zonas de riesgo por inundaciones y deslizamientos, aumentando la exactitud en la

delimitación de áreas vulnerables y la identificación de factores condicionantes en los fenómenos de riesgo.

La cartografía temática generada constituye un insumo crucial para la gestión integral del riesgo, proporcionando información clara, precisa y georreferenciada. Esta herramienta apoya la planificación territorial, permitiendo a los tomadores de decisiones implementar estrategias de mitigación y respuesta más efectivas y eficientes. De igual modo, facilita la priorización de recursos en áreas críticas, optimizando la ejecución de medidas preventivas ante fenómenos hidrometeorológicos y geológicos.

La capacidad de los productos generados para integrarse con sistemas de información geográfica preexistentes favorece la interoperabilidad entre diversas entidades gubernamentales y no gubernamentales. Esta integración promueve la colaboración

multidisciplinaria y la coordinación en la gestión de riesgos, facilitando el intercambio de información crítica y la toma de decisiones basadas en datos sólidos. La sinergia interinstitucional resultante es clave para una respuesta integral y articulada frente a amenazas naturales, mejorando la resiliencia territorial.

La diseminación de los resultados del estudio y la formación de actores locales en la interpretación de la cartografía temática ha sido fundamental para fortalecer la capacidad de respuesta ante emergencias. Este enfoque fomenta una cultura de prevención al incrementar la comprensión de los riesgos a nivel comunitario, capacitando a las poblaciones vulnerables para actuar proactivamente. De igual modo, la apropiación de estas herramientas por parte de los actores locales promueve una resiliencia comunitaria y una respuesta más eficaz ante eventos adversos.

7. Referencias citadas

- BENITO, C. A. 2008. "Anáglifo digital del relieve de la península Ibérica". *Tierra y Tecnología*, 4(33): 71-74.
- BOULTON, S. y M. STOKES. 2018. "¿Qué DEM es mejor para analizar el desarrollo del paisaje fluvial en terrenos montañosos?". *Geomorfología*, 310: 168-187. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.002>.
- CARVAJAL, J. H. 2012. *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- COELHO, L. y B. J. NUNES. 2007. "Fotogrametría digital". EdUERJ. Río de Janeiro, Brasil.
- CORANTIOQUIA (2016-2019). 2023. *Por el patrimonio ambiental de nuestro territorio. Plan de acción 2016-2019*. Disponible en: <http://www.corantioquia.gov.co/>.
- CHENG, Y.; MENG, T.; SHIH, K. y H. CHI. 2018. "Método de planificación de rutas de UAV para la reconstrucción digital de modelos de terreno: un ejemplo de ventilador de escombros". *Automatización en la Construcción*, 93: 214-230. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.024>.
- DI GIROLAMO, A. 2008. *Las elevaciones de los puntos determinadas con GPS. Variaciones locales de las desviaciones geoidales en Trentino Alto Adige*. Informe técnico. Oficina de Topografía Geodésica—Región Autónoma de Trentino Alto Adige. Bolzano, Italia.

- ESRI. 2014. *ESRI*. Disponible en: <http://www.arcgis.com/features/>.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M. ET AL. 2007. "La misión de topografía de radar del transbordador". *Revista de Geofísica*, 45: RG2004. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.
- FLORINSKY, I. V. 2016. *Análisis digital del terreno en edafología y geología*. Elsevier/Academic Press.
- GARCÍA, S.; RODRÍGUEZ, E.; MIRALLES, I.; LUNA, L.; DOMENE, M.; SOLÉ, A. e Y. CANTÓN. 2018. "Las técnicas de recolección de agua basadas en la modificación del terreno mejoran la supervivencia de la vegetación en la restauración de tierras secas". *CATENA*, 167: 319-326. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.004>.
- GENG, X.; XU, Q.; XING, S.; HOU, Y. F.; LAN, C. Z. y J. J. ZHANG. 2018. "Procesamiento fotogramétrico de imágenes de barrido lineal planetario basadas en ortofotos aproximadas". *Archivos Internacionales de Fotogrametría, Teledetección y Ciencias de la Información Espacial*, XLII-3: 391-396. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-391-2018>.
- GESCH, D. B. 2018. "Mejores prácticas para evaluaciones basadas en la elevación del aumento del nivel del mar y la exposición a inundaciones costeras". *Fronteras en Ciencias de la Tierra*, 6: 230. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00230>.
- GONZÁLEZ-MORADAS, C. y W. VIVEEN. 2020. "Evaluación de los DEM ASTER GDEM2, SRTMv3.0, ALOS AW3D30 y TanDEM-X para los Andes peruanos frente a puntos de control terrestre GNSS de alta precisión y métricas geomorfológico-hidrológicas". *Teledetección del Medio Ambiente*, 237: 111509. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111509>.
- GROHMANN, C. H. 2018. "Evaluación de DEMs TanDEM-X en sitios brasileños seleccionados: comparación con SRTM, ASTERGDEM y ALOS AW3D30". *Teledetección del Medio Ambiente*, 212: 121-133. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.043>.
- ISHTIAQUE, A. y M. S. RAHMAN. 2020. "Evaluación de los efectos de los modelos digitales de elevación en el mapeo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en el distrito de Rangamati, Bangladesh". *Teledetección*, 12(17): 2.718. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs12172718>.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI-IGAC & CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CENTRO DE ANTIOQUIA-CORANTIOQUIA. 2013. *Proyecto estimación y mapificación de amenazas por inundaciones y fenómenos de remoción en masa en la jurisdicción de Corantioquia, con el uso de tecnologías geoespaciales. Fase I: cuenca baja de los ríos Cauca y Nechí*. [Convenio interadministrativo 9199 de Corantioquia y 4226 del IGAC del 12 de marzo de 2012]. Bogotá, Colombia.
- KAKAVAS, M. P. y K. G. NIKOLAKOPOULOS. 2021. "Modelos digitales de elevación de desprendimientos de rocas y deslizamientos de tierra: una revisión y metaanálisis". *Geociencias*, 11(6): 256. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/geosciences11060256>.

- KENNELLY, P. J. 2008. "Mapas de terreno que muestran sombreado de colinas con curvatura". *Geomorfología*, 11(102): 567-577. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.046> .
- LERMA G. J. L. 2002. *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- LILLESAND, T.; KIEFER, R. W. y J. CHIPMAN. 2015. *Teledetección e interpretación de imágenes*. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ.
- MARQUES, K.; DEMATTE, J.; MILLER, B. e I. LEPSCH. 2018. "Segmentación geomorfométrica de elementos complejos de ladera para el mapeo digital detallado de suelos en el sudeste de Brasil". *Geoderma Regional*, 14: e00175. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00175> .
- MENDIVELSO, D. 2008. *Metodología para levantamientos fotogeológicos*. Memorias curso de fotogeología, geomorfología y aplicaciones de percepción remota. Bogotá, Colombia. (Inédito).
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B. y A. LADSON. 1991. "Modelización digital del terreno: una revisión de las aplicaciones hidrológicas, geomorfológicas y biológicas". *Procesos Hidrológicos*, 28(5): 3-30. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103> .
- PENNA, D.; BORGA, M.; ARONICA, G. T.; BRIGANDÌ, G. y P. TAROLLI. 2014. "La influencia de la resolución de la cuadrícula en la predicción de deslizamientos de tierra poco profundos naturales y relacionados con carreteras". *Hidrología y Ciencias del Sistema Terrestre*, 18: 2.127-2.139. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/hess-18-2127-2014>.
- QUINTERO, M. E.; QUINTERO, M. y J. VILA. 2018. "Explorando el uso de la tierra/cambio de cobertura de la tierra y los impulsores en las montañas andinas en Colombia: Un caso en el Quindío rural". *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 634: 1.288-1.299. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.359>.
- RAMÍREZ, S.; ESPEJO, C.; RAMÍREZ, M.; PÁEZ, A. & D. GÓMEZ. 2020. "Method for vertical accuracy assessment of digital elevation models derived from remote sensing data". *Revista Geográfica Venezolana*, 61(1): 100-119. Disponible en: <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/regeoven/article/view/17880/21921929140>.
- VAN ZUIDAM, R. 1985. *Fotointerpretación aérea en análisis de terrenos y cartografía geomorfológica*. Editorial Smith. La Haya, Países Bajos.
- VARNES, D. J. 1978. "Tipos y procesos de movimiento de taludes". En: R. L. SCHUSTER y R. J. KRIZEK (Eds.), *Análisis y control de deslizamientos de tierra*, (pp. 11-33). [Informe especial 176 de la Junta de Investigación del Transporte]. Academia Nacional de Ciencias. Washington D. C. Disponible en: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf>.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Bogotá, Colombia; julio, 2024. Revisión octubre, 2024