Vulnerabilidad social frente a avenida torrencial (flujo de detritos) en el área de influencia de la quebrada Isabel Pérez en Santiago de Cali, Colombia, usando lógica difusa

Valentina Aponte García
Diego Fernando Tarapuez Bolaños
Nathalie García Millán
Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

Universidad del Valle, Cali. Departamento de Geografía
Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano-OSSO
0009-0008-2298-5361; vapontegarcia@gmail.com
0009-0008-8361-9795; diego.tarapuez@correounivalle.edu.co
0000-0002-0002-3881; nathalie.garcia@correounivalle.edu.co
0000-0002-6753-7094; elkin.salcedo@correounivalle.edu.co

© de los autores y las autoras

Recepción: julio de 2025
Aceptación: diciembre de 2025
Publicación: febrero de 2026

Citación recomendada: Aponte García, Valentina; Tarapuez Bolaños, Diego Fernando; García Millán, Nathalie y Salcedo Hurtado, Elkin de Jesús (2026). «Vulnerabilidad social frente a avenida torrencial (flujo de detritos) en el área de influencia de la quebrada Isabel Pérez en Santiago de Cali, Colombia, usando lógica difusa». *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 72(1), 135-167. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.1445>

Resumen

Esta investigación evaluó la vulnerabilidad social frente a avenidas torrenciales en el área de influencia de la quebrada Isabel Pérez, en Santiago de Cali, mediante un enfoque mixto que combinó cartografía, proceso analítico jerárquico, lógica difusa y modelamiento espacial. Los eventos afectan principalmente a las comunidades de Belén y La Nave del barrio Siloé, generando daños materiales, pérdidas económicas y víctimas humanas. De los 97 hogares encuestados, el 52% presenta vulnerabilidad alta; el 20%, media, y el 25%, baja, concentrándose los niveles más altos en la parte superior de la quebrada. El capital financiero es el componente más afectado: el 80% de los hogares tiene ingresos iguales o inferiores a sus gastos, solo el 15% reporta ingresos adicionales y el 27% logra algún nivel de ahorro. El estudio aporta al análisis de la relación entre avenidas torrenciales y medios de vida sostenible, además de ofrecer una base para futuras investigaciones sobre vulnerabilidad social.

Palabras clave: medios de vida sostenibles; vulnerabilidad social; lógica difusa; método AHP

Resum. *Vulnerabilitat social davant d'avingudes torrencials (flux de detritus) a l'**àrea d**'influència del torrent Isabel Pérez a Santiago de Cali, Colòmbia, usant lògica difusa*

Aquesta investigació va avaluar la vulnerabilitat social davant d'avingudes torrencials a l'àrea d'influència del torrent Isabel Pérez, a Santiago de Cali, mitjançant un enfocament mixt que va combinar cartografia, procés analític jeràrquic, lògica difusa i modelització espacial. Els esdeveniments afecten principalment les comunitats de Belén i La Nave, al barri Siloé, generant danys materials, pèrdues econòmiques i víctimes humanes. De les 97 llars enquestades, el 52% presenta una vulnerabilitat alta; el 20%, mitjana, i el 25%, baixa, i els nivells més elevats es concentren a la part superior del torrent. El capital financer n'és el component més afectat: el 80% de les llars té ingressos iguals o inferiors a les despeses, només el 15% gaudeix d'ingressos addicionals i el 27% aconsegueix algun nivell d'estalvi. L'estudi contribueix a analitzar la relació entre les avingudes torrencials i els mitjans de vida sostenibles, a més d'oferir una base per a futures investigacions sobre vulnerabilitat social.

Paraules clau: mitjans de vida sostenibles; vulnerabilitat social; lògica difusa; mètode AHP

Résumé. *Vulnérabilité sociale face aux crues torrentielles (coulées de débris) dans la zone d'influence du ruisseau Isabel Pérez à Santiago de Cali, Colombie, au moyen de la logique floue*

Cette recherche a évalué la vulnérabilité sociale aux inondations torrentielles dans la zone d'influence du cours d'eau Isabel Pérez à Santiago de Cali, en se basant sur une approche mixte associant la cartographie, le processus analytique hiérarchique, la logique floue et la modélisation spatiale. Les événements ont eu principalement des conséquences dans les communautés de Belén et de La Nave dans le quartier de Siloé, générant des dommages matériels et des pertes économiques et humaines. Sur les 97 ménages étudiés, 52 % présentent une vulnérabilité élevée, 20 % une vulnérabilité moyenne et 25 % une vulnérabilité faible, les niveaux les plus élevés étant concentrés dans la partie supérieure du ravin. Le capital financier est l'élément le plus touché : 80 % des ménages ont un revenu égal ou inférieur à leurs dépenses, seuls 15 % déclarent un revenu supplémentaire et 27 % atteignent un certain niveau d'épargne. L'étude contribue à l'analyse de la relation entre les inondations torrentielles et les moyens de subsistance durables, fournissant une base pour la recherche future sur la vulnérabilité sociale.

Mots-clés : moyens de subsistance durables ; vulnérabilité sociale ; logique floue ; méthode AHP

Abstract. *Social vulnerability to torrential floods (debris flows) in the area of influence of the Isabel Pérez ravine in Santiago de Cali, Colombia, using fuzzy logic*

This research evaluated social vulnerability to torrential floods in the area of influence of the Isabel Pérez ravine in Santiago de Cali, using a mixed approach that combined mapping, hierarchical analytical process, fuzzy logic and spatial modelling. Previous events have mainly affected the communities of Belén and La Nave in the Siloé neighbourhood, causing material damage, economic and human losses. Of the 97 households surveyed, 52% presented high vulnerability, 20% medium and 25% low, with the highest levels located in the upper part of the ravine. Financial capital was the most impacted element: 80% of households have an income that is equal to or lower than their expenses, only 15% report an additional income and 27% have some degree of savings. This study contributes to the analysis of the relationship between torrential floods and sustainable livelihoods, providing a basis for future research on social vulnerability.

Keywords: sustainable livelihoods; social vulnerability; fuzzy logic; AHP method

Sumario

1. Introducción
2. Avenida torrencial (flujo de detritos)
3. Área de estudio
4. Datos
5. Métodos
6. Resultados
7. Medidas de mitigación
8. Discusión
9. Conclusiones
Referencias bibliográficas

1. Introducción

En los últimos años la variabilidad climática ha estado relacionada con el aumento de riesgos naturales como flujos de lodo, movimientos en masa, inundaciones y, especialmente, flujos de detritos o avenidas torrenciales (AVT) (Catto y Dowdy, 2021; Chen y Chen, 2022). Estos eventos son altamente destructivos y pueden provocar daños severos a la población y a las infraestructuras (Tudose et al., 2020). Entre ellos, las avenidas torrenciales se destacan como uno de los procesos geomorfológicos más peligrosos en zonas montañosas, debido a su alta movilidad, que puede afectar tanto al cauce como a las áreas aledañas y al abanico de escombros (Jakob et al., 2012; Hürlimann et al., 2006; Iverson, 2014). El proceso de urbanización en zonas de abanicos ha incrementado el riesgo asociado a las avenidas torrenciales, lo que convierte en imprescindible realizar evaluaciones detalladas del peligro en estas áreas para proteger a las personas y a las infraestructuras, así como para mejorar la gestión del riesgo (Hürlimann et al., 2006). En este contexto, diversos autores han desarrollado modelos para entender el comportamiento físico de estos fenómenos, enfocados en la dinámica de la mezcla entre sólido y fluido; la interacción entre partículas y fluido, y las fuerzas que impulsan el movimiento (Li et al., 2024; Zhang et al., 2025).

En las últimas décadas se han desarrollado modelos numéricos para simular y predecir los flujos de detritos, los cuales simplifican las complejas interacciones entre agua y sólidos mediante enfoques monofásicos y modelos reológicos que representan la resistencia al flujo (Zegers et al., 2020). Con base en variables como la forma, el volumen del material desplazado, la velocidad del flujo o los depósitos, diversos autores han propuesto tipificaciones y caracterizaciones de estos fenómenos (Hungr, 2005; Jakob, 2005; Takahashi, 2014). Estas variables también han sido claves para evaluar el peligro y el riesgo, apoyar decisiones sobre mitigación pasiva o activa (Jakob, 2005) y también para predecir tiempos de viaje, facilitando acciones como evacuaciones oportunas o el cierre de corredores de transporte (Jakob, 2005).

Las avenidas torrenciales o flujos de detritos, debido a su alta energía y rápida ocurrencia, poseen una gran capacidad destructiva, lo que las vincula a significativas pérdidas humanas, materiales, sociales y económicas en distintas regiones del mundo (Santi et al., 2011). Esta realidad resalta la necesidad de

realizar estudios sobre amenaza y riesgo, que evalúen tanto la probabilidad de ocurrencia como los posibles impactos. Para ello, se han desarrollado y aplicado diversos métodos de análisis en distintas partes del mundo (Santi et al., 2011; Iverson, 2014; Jakob, 2021; Bocanegra et al., 2023; Li et al., 2023).

El riesgo no depende únicamente de la ocurrencia de fenómenos naturales intensos, sino también de las condiciones de vulnerabilidad, entendida como la exposición y la fragilidad de los elementos susceptibles de ser afectados. Esta vulnerabilidad favorece la materialización de desastres y obstaculiza el desarrollo social y económico de las comunidades. Por ello, los riesgos naturales, aunque detonados por fenómenos propios de la dinámica natural, deben comprenderse como una construcción social (Fitton et al., 2021; Cutter, 2024; McCullagh et al., 2025). La vulnerabilidad se enmarca en un contexto influenciado por factores socioeconómicos, políticos y culturales, siendo un constructo colectivo y cultural, más que individual, que responde a raíces históricas, creencias y visiones dominantes. En este sentido, el riesgo es una construcción social y cultural, donde la vulnerabilidad constituye un componente central (García-Acosta, 2005).

Dada la naturaleza de los flujos de detritos, que suelen producirse como crecidas súbitas de ríos o quebradas de alta pendiente bajo el efecto de altas precipitaciones, y como un fenómeno con graves consecuencias que, a su vez, pueden asociarse concomitantemente con otros tipos de peligros, las poblaciones expuestas a ellos revelan altas condiciones de vulnerabilidad que, acorde con Santi et al. (2011), tienden a estar sujetas a diversos aspectos como, por ejemplo: restricción económica (muchas personas y familias sin capacidades se ven obligadas a ocupar lugares peligrosos porque son relativamente baratos y no tienen recursos para reubicarse); restricción espacial (quienes viven en zonas topográficamente limitadas, especialmente cuando la población o las actividades de desarrollo exigen la expansión hacia zonas más peligrosas), y, por último, restricción de influencia y poder (quienes tienen un poder sociopolítico demasiado débil o son muy pocos para influir en la mitigación y obtener protección) (Santi et al., 2011). De los factores del riesgo por flujos de detritos, la vulnerabilidad es quizás el más difícil de estimar con seguridad, debido a que, por un lado, la muerte de personas suele estar asociada a daños o a derrumbes de edificios, por lo que es una consecuencia indirecta y, por otro lado, resulta muy difícil predecir el tipo y la magnitud de los daños en los edificios (Jakob et al., 2012).

En el presente estudio se evalúa la vulnerabilidad social ante avenidas torrenciales (flujos de detritos) en la zona de influencia de la quebrada Isabel Pérez, ubicada en la Comuna 20 de la ciudad de Santiago de Cali, departamento del Valle del Cauca (Colombia). Dicha evaluación se realiza determinando el impacto sobre los medios de vida sostenibles (MVS) de los hogares expuestos. Si bien este factor social determina el grado de afectación que sufrirán los hogares, sus diversos componentes representan las capacidades desarrolladas o ausentes en la comunidad para enfrentar la presión de impacto o fuerza de la amenaza considerada. Se aplica la lógica difusa para operar las respectivas variables, y el proceso analítico jerárquico (AHP) para ponderar factores y sistemas de información geográfica (SIG) para la espacialización de los resultados.

Siguiendo a Cutter y Morath (2013), la vulnerabilidad social se considera una medida relativa en cada hogar analizado.

2. Avenida torrencial (flujo de detritos)

La *avenida torrencial* es un término difundido en el territorio colombiano que representa un tipo de fenómeno natural amenazante, que ocurre generalmente en zonas montañosas o de laderas y que ha impactado severamente a muchas poblaciones de diversas regiones del país. El término *avenida torrencial* es ampliamente utilizado en Colombia por las autoridades, los científicos y la comunidad para incorporar la gestión del riesgo de desastres en la planificación y el ordenamiento territorial (Congreso de la República de Colombia, 2012; Gómez-Cardona et al., 2021; Ramos et al., 2021). En la literatura, este término o el de *flujo de detritos* a veces se emplea de manera general para describir procesos similares sin distinguir sus tipologías (Hungr, 2005; Jakob, 2005; Jakob y Hungr, 2005; Takahashi, 2014). Es decir que el flujo de detritos es un tipo específico de avenida torrencial que, en términos generales, se podría diferenciar de esta por su alta concentración de sedimentos y consistencia; sin embargo, los criterios utilizados para distinguir estos dos tipos de fenómenos pueden variar de un autor a otro (Coussot y Meunier, 1996). A pesar de sus diferencias, en el presente trabajo, por las características geomorfológicas de la zona de estudio, estos fenómenos se consideran de manera similar según la clasificación de Pierson y Costa (1987), en virtud de que ambos son flujos rápidos que transportan una mezcla de agua y sedimentos (como lodo, rocas, troncos de árboles, entre otros) por cauces con pendiente.

La definición de *avenida torrencial* o *flujo de detritos* adoptada en este trabajo corresponde a la usada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), que lo expresa como un flujo rápido que se desplaza por cauces de alta pendiente, generado por lluvias intensas y que transporta una mezcla de agua con sólidos en distintas proporciones (Ramos et al., 2021). Estos sólidos pueden provenir de laderas o del lecho del cauce. Al llegar a zonas de menor pendiente, el material es depositado. Este concepto incluye flujos de detritos, de lodos e hiperconcentrados (Ramos et al., 2021).

Las avenidas torrenciales o flujos de detritos son un tipo de peligro geológico común en zonas montañosas y responsables de desastres significativos, tanto en Colombia como a nivel mundial (Santi et al., 2011; Iverson, 2014; Gómez-Cardona et al., 2021; Jakob, 2021; Ramos et al., 2021). Se caracterizan por ser flujos súbitos y breves compuestos por agua, rocas, tierra y vapor, con un proceso de formación complejo (Li et al., 2023). Su alta densidad, gran fluidez y velocidad los hacen altamente destructivos, afectando gravemente a personas, bienes, economía y medio ambiente, especialmente en regiones montañosas y sísmicamente activas (Li et al., 2023). Algunos casos importantes de este tipo de fenómenos son el de Yungay, Perú (1970), correspondiente a un flujo masivo de millones de metros cúbicos de roca, hielo y lodo que descendió desde el monte Huascarán destruyendo pueblos como Yungay y Ranrahirca y dejando

más de 18.000 víctimas mortales (Evans et al., 2009); el flujo (deslave) del río Limón, en Venezuela, ocurrido en el año 1987, donde precipitaciones del orden de 180 mm/m^2 en 6 horas fueron el detonante de un evento de inundación masiva con sedimentos que cubrió millones de kilómetros cuadrados, causando entre 900.000 y 2 millones de muertes debido a la hambruna y a la enfermedad (Audemard et al., 1989). En Colombia, uno de los eventos más significativos de este tipo, ocurrido en los últimos tiempos, tuvo lugar el 1 de abril de 2017, cuando un flujo de lodo, rocas y escombros arrastrados por el agua devastó la ciudad de Mocoa (Putumayo), causando al menos unas 250 muertes y más de 22.000 afectados (Moreno-Murillo et al., 2019).

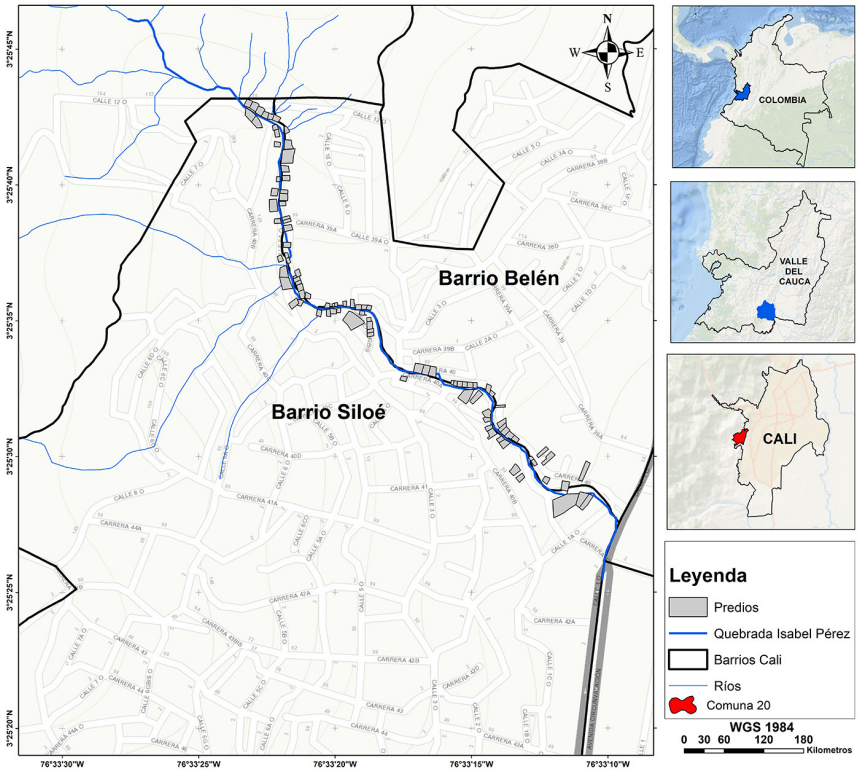
A nivel mundial se han desarrollado metodologías innovadoras para evaluar y gestionar el riesgo debido a avenidas torrenciales, dada su alta peligrosidad. En Serbia el uso combinado del método del potencial de erosión (EPM) y el índice del potencial de inundación repentina (FFPI) permitió caracterizar la cuenca del río Timok como altamente susceptible a inundaciones y erosión (Dragićević et al., 2022). En España, en la región de Cartagena, se evidenció cómo los cambios en el uso del suelo y la infraestructura hidráulica han modificado la dinámica fluvial mediante análisis multitemporales y sensores remotos (Betancourt-Suárez et al., 2021). En Rumanía, en zonas Natura 2000, se desarrolló una metodología que integra vulnerabilidad socioeconómica y simulaciones hidráulicas para identificar cuencas de alto riesgo torrencial (Tudose et al., 2020). En Colombia, estudios en la quebrada Doña María emplearon SIG y técnicas de residuos ponderados para estimar la peligrosidad de las avenidas torrenciales (Montoya et al., 2009), mientras que en Guacamayas (Boyacá) se aplicó un enfoque multiescalar con modelación fluidodinámica y análisis histórico para zonificar la amenaza por este tipo de fenómeno natural (Rangel Flórez et al., 2021). Dichos trabajos reflejan la evolución de los enfoques técnicos y metodológicos en distintos contextos geográficos, climáticos y socioambientales, y constituyen una base sólida para la planificación territorial y la gestión del riesgo ante fenómenos hidrometeorológicos extremos.

3. Área de estudio

La quebrada Isabel Pérez nace en la parte alta de los cerros occidentales de la ciudad de Santiago de Cali, departamento del Valle del Cauca, localizado en el suroccidente del territorio colombiano (figura 1). Es necesario aclarar que en Colombia y otros países andinos el término *quebrada* se utiliza para designar cursos de agua pequeños y de alta pendiente (Gomi et al., 2002). Desde el punto de vista hidrogeomorfológico estos sistemas se caracterizan por confinamiento lateral, respuesta rápida a las lluvias y dominio de procesos de erosión y transporte de sedimentos gruesos, típicos de cuencas de montaña.

En el área urbana, la quebrada se encuentra ubicada en la Comuna 20, entre el barrio de Belén y el sector de San Francisco en el barrio de Siloé. Recorre a través de la carrera 40B, la calle 7 oeste, y desemboca finalmente en el canal de la calle 1 con carrera 42 en el sector de la Nave. Esta comuna está constituida por

Figura 1. Localización de la quebrada Isabel Pérez en la Comuna 20 de la ciudad de Cali



Fuente: elaboración propia.

ocho barrios y tres urbanizaciones, 478 manzanas, 9.198 predios construidos y 15.828 viviendas (Alcaldía de Santiago de Cali, 2008), de las cuales 310 predios y 915 viviendas pertenecen al área de influencia de la quebrada.

En el área de estudio predominan suelos residuales y transportados altamente propensos a la erosión, desarrollados sobre materiales geológicos variados y fracturados. La quebrada Isabel Pérez se localiza sobre rocas volcánicas oceánicas del Cretácico (Kv) y rocas sedimentarias del Terciario (TOg), las cuales dan origen a suelos residuales y transportados de distinta granulometría y elevada inestabilidad (CVC y Univalle, 2019).

Geomorfológicamente, la cuenca de la quebrada Isabel Pérez está conformada por laderas de pendientes que varían de suaves a empinadas, cubiertas principalmente por suelos residuales y, en menor proporción, por suelos transportados con fragmentos rocosos; la cobertura vegetal superficial es delgada, y los espesores de suelo varían desde aproximadamente 2 metros en el sector occidental hasta unos 15 metros hacia el extremo oriental de la cuenca (CVC y Univalle, 2019).

En términos de unidades del paisaje, predominan las unidades denudacionales, seguidas por unidades morfoestructurales, antrópicas y morfodinámicas. Las unidades denudacionales corresponden a geoformas generadas por la escorrentía, caracterizadas por una erosión superficial y laminar lenta, desarrollada sobre una topografía condicionada por el sistema de falla Cali-Patía y otras estructuras locales. Este control estructural contribuye a la formación de cauces angostos, de alta pendiente, y explica la marcada diferencia geomorfológica que presenta esta cuenca respecto a las áreas situadas al norte y al sur. Se considera que las fallas con orientación este-oeste han ejercido una influencia significativa en el modelado y la diferenciación del relieve dentro del área de estudio (CVC y Univalle, 2019).

El reconocimiento en campo evidenció que la quebrada Isabel Pérez está entamborada desde el inicio del asentamiento, lo que dificulta su visualización

Figura 2. Entamboramiento de la quebrada Isabel Pérez



Nota: en las imágenes superiores se muestra el box culvert (a y c), construido al inicio del asentamiento. En el desarenador (b) se encauzan los afluentes de la quebrada. En las imágenes inferiores (d, e y f) se pueden observar algunos daños ocasionados en la vía y en las viviendas por la ocurrencia de eventos de avenida torrencial. En la imagen inferior del centro (e) se aprecia, en la pared de una de las viviendas afectadas, el nivel alcanzado por el flujo de las avenidas torrenciales ocurridas en los años 2016 y 2018.

Fuente: elaboración propia.

en superficie (figura 2). Antes de esta intervención estructural, la comunidad utilizaba la quebrada para lavar ropa y recrearse, pero ahora la percibe como un peligro latente. El entamboramiento se construyó para controlar el cauce y mejorar la accesibilidad a las viviendas. Sin embargo, en los años 2016 y 2018 ocurrieron eventos de avenidas torrenciales que superaron su capacidad y causaron daños materiales y pérdidas de vidas humanas.

4. Datos

4.1. Modelación de la amenaza: Determinación de los elementos expuestos

Para evaluar la disposición de los elementos expuestos a avenidas torrenciales en la zona de influencia de la quebrada Isabel Pérez, se usaron los resultados del proyecto de zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo (CVC y Univalle, 2020). Este estudio espacializó variables físicas clave, como la profundidad (H) y la velocidad del flujo (V), para caracterizar la amenaza. La exposición se determinó combinando la ubicación de elementos sociales con respecto al arrastre de sólidos y al flujo de agua, considerando la posición relativa en el perfil longitudinal y los cambios de pendiente del terreno, definidos a partir del modelo digital de elevación.

En la tabla 1 se presenta la matriz de intersección de las zonas de las secciones transversal y longitudinal de la quebrada que determina el grado de exposición de los elementos que podrían ser afectados por la avenida torrencial (CVC y Univalle, 2020).

4.2. Variables sociales de resistencia: Capacidades

Desde que se empezó a incorporar la evaluación de la vulnerabilidad social en la gestión del riesgo de desastres, se han utilizado diversas variables para medirla y cuantificarla (Cutter et al., 2003). Entre los factores más importantes para esta valoración se encuentran la edad, el género, la educación y el estatus socioeconómico, entre otros (Cutter et al., 2003; Cutter, 2024).

Se identificaron los capitales o las dimensiones que conforman los elementos sociales dentro del marco de la teoría de los medios de vida sostenibles

Tabla 1. Niveles del grado de exposición ante una avenida torrencial en la quebrada Isabel Pérez

Zona de exposición en la sección transversal de la quebrada Isabel Pérez	Zona de exposición ante los materiales del flujo en el perfil longitudinal		
	1,0	0,9	0,8
1,0	1,0	0,9	0,8
0,7	0,7	0,63	0,56
0,4	0,4	0,36	0,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Capitales y variables de MVS, como capacidades de los hogares frente a la amenaza por avenidas torrenciales en el área de estudio

(Capitales) Dimensión	Descripción de la dimensión	Nombre de las variables	Descripción de la variable	Dominio respecto a la vulnerabilidad con los datos del estudio
Natural	En los medios de vida sostenibles, la relación entre capital natural y vulnerabilidad es estrecha. Los desastres naturales, como incendios, inundaciones, sequías y terremotos, no solo afectan a las poblaciones más vulnerables, sino que también destruyen el capital natural, agravando su situación.	Impactos	Son los recursos utilizados para la sustentación, como el agua, el uso del suelo y las huertas, etc.	Disminuye
		Conflictos	Son las construcciones sobre el área de protección de la quebrada, inadecuada disposición de residuos, tala de árboles en la parte alta de la quebrada y deslizamientos en la parte alta y entamboramiento de la quebrada.	Aumenta
Humano	El capital humano engloba aptitudes, onocimientos, salud y capacidades laborales que permiten a las poblaciones esarrollar estrategias para sus medios de ida. En los hogares, influye en la cantidad y la calidad de la mano de obra, dependiendo del tamaño familiar, la formación y el liderazgo.	Conocimiento del fenómeno	Son el conjunto de saberes sobre la ocurrencia, la identificación, la capacitación y las medidas a tomar frente al fenómeno.	Disminuye
		Empleo	Es el tipo de contrato, si lo hay, con que cuenta el jefe del hogar.	Aumenta
		Educación	Nivel educativo del jefe del hogar.	Aumenta
		Discapacidad	Número de personas que hay en el hogar con algún tipo de discapacidad.	Aumenta
		Creencia	Tipo de creencia que tiene el jefe del hogar.	Disminuye
Social	Redes y conexiones que aumentan la confianza y la habilidad de las poblaciones para trabajar en grupo y ampliar su acceso a instituciones de mayor alcance, como organismos políticos o civiles.	Redes de apoyo local	Si algún miembro de la familia pertenece a alguna red de apoyo local o institucional.	Aumenta
		Acceso a la información	¿Con qué medio de comunicación cuenta para acceder a la información?	Disminuye
Físico	Infraestructuras y equipamientos que responden a las necesidades básicas y productivas de la población. Es decir, medios de transporte asequibles, alojamientos y edificios seguros, suministro de agua y saneamiento adecuados, energía asequible.	Medios de transporte	Si el hogar cuenta con algún tipo de vehículo propio, público o privado.	Aumenta
		Infraestructura de la vivienda	Tipo de infraestructura con que cuenta el hogar.	Aumenta
		Servicios públicos	Los servicios públicos con los que cuenta el hogar.	Aumenta
		Electrodomésticos	Cantidad de electrodomésticos con que cuenta el hogar.	Disminuye
		Equipos tecnológicos	Cantidad de equipos tecnológicos con que cuenta el hogar.	Aumenta
Financiero	Recursos económicos asociados a los ingresos, ahorros (dinero en metálico, depósitos bancarios o activos líquidos como el ganado o las joyas), créditos, préstamos, pensiones, subsidios, donaciones y remesas.	Ingresos	Son los ingresos del hogar del trabajo, ingresos extras o subsidios.	Aumenta
		Ahorros	Con qué tipo de mecanismo de ahorro cuentan.	Aumentan
Componente hogar	Son los conjuntos de variables que describen las características y las dinámicas internas de una unidad familiar.	Edad limitante	Cantidad de niños de primera infancia y adultos mayores.	Aumenta
		Personas en el hogar	Cantidad de personas viviendo en el hogar.	Disminuye
		Tiempo de permanencia	Tiempo que lleva viviendo en el sector.	Aumenta
		Tipo de población	Qué tipo de población hay en la casa, si es desplazada, migrante, etc.	Disminuye

Fuente: elaboración propia

(Akram-Lodhi, 2011). Para la valoración de la vulnerabilidad, estos capitales se entienden como las capacidades (aptitudes y talentos); los recursos (económicos, físicos, naturales, humanos y sociales), y las actividades (generación de empleo e ingresos) que la población utiliza para mejorar su calidad de vida y bienestar, así como para contrarrestar el impacto potencial de las amenazas naturales. Este enfoque pone énfasis en las personas, sus potencialidades, oportunidades, estrategias e iniciativas, desde una perspectiva integral que reconoce sus interacciones (Gottret, 2011). De lo anterior, se definieron las variables sociales de resistencia o capacidades basadas en los cinco capitales que constituyen los MVS (natural, humano, físico, financiero y social), a los cuales se añadió un componente relacionado con el hogar. En total, se identificaron 20 variables que fueron analizadas mediante 30 indicadores. La tabla 2 presenta la descripción de cada uno de estos capitales, siguiendo las directrices establecidas por las hojas de orientación sobre los MVS del Departamento para el Desarrollo Internacional del Reino Unido (DFID, 2001). Además, en dicha tabla se incluye el dominio respecto a la vulnerabilidad según los datos del estudio, indicando si cada variable incrementa o disminuye la condición de vulnerabilidad.

Para identificar los elementos sociales expuestos, asociados a los cinco capitales de los MVS, se aplicó una encuesta estructurada a 97 hogares ubicados en zonas de alta amenaza por avenidas torrenciales en la quebrada Isabel Pérez, de la ciudad de Santiago de Cali. La encuesta, con enfoque cualicuantitativo, incluyó 29 preguntas distribuidas en siete secciones. Se realizaron cuatro visitas técnicas para su aplicación, georreferenciación, registro fotográfico y validación del jefe del hogar como informante. Según el Departamento Nacional de Estadística de Colombia (DANE), el jefe del hogar es la persona, hombre o mujer, que los demás miembros del hogar reconocen como el responsable principal, bien sea del sostén económico, por autoridad, edad o respeto. Los datos para este estudio también fueron complementados con información secundaria y cartográfica.

5. Métodos

5.1. Vulnerabilidad social

Varios autores, como Li et al. (2010) y Du et al. (2014), definen la vulnerabilidad como una función de la intensidad del peligro (*I*) asociada con los elementos expuestos en riesgo y la capacidad de resistencia (*R*) de los elementos para soportar una amenaza. Así, su evaluación se realiza en función de estas dos variables como: (Li et al., 2010). Por su parte, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático define la vulnerabilidad como la susceptibilidad de un sistema a los efectos adversos del cambio climático y su capacidad limitada para afrontarlos; en este sentido, la evalúa mediante la interacción de tres factores: la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación (IPCC, 2014).

A pesar de que la vulnerabilidad representa un componente fundamental para la evaluación del riesgo (Varnes, 1984) y aunque se refiere al grado de pérdida que pueden sufrir los elementos en riesgo, Cannon (1993) ha considerado que este concepto se ha convertido en uno de esos términos resbaladizos que se utiliza para significar tantas cosas diferentes, por lo que corre el peligro de perder su significado real. Por tal razón aún no hay consenso metodológico para su evaluación cuantitativa, lo que conduce a que se usen diversos tipos de parámetros y relaciones matemáticas (Li et al., 2010; Du et al., 2014).

El *Diccionario de la lengua española* define *vulnerabilidad* como «cualidad de vulnerable» y *vulnerable* significa «que puede ser herido o recibir lesión, física o moralmente». Es decir, un elemento vulnerable es débil o frágil. En esta definición semántica se asume que existe un elemento expuesto con la cualidad de ser frágil ante una amenaza o una fuerza externa. En este sentido, en las dos definiciones expuestas arriba se encuentran variables útiles para una evaluación precisa de la vulnerabilidad. Por parte de Li et al. (2010) y Du et al. (2014) se considera la intensidad como la fuerza del evento amenazante y la resistencia del elemento expuesto, mientras que por parte del IPCC se considera la exposición de elementos ante el fenómeno amenazante y la sensibilidad o fragilidad de estos.

De esta manera, dado que la vulnerabilidad sigue siendo un concepto multifacético, el presente trabajo explora un nuevo modelo de evaluación de aquella, influenciado por una combinación inicial de dos variables fundamentales: la exposición (estar en contacto con una amenaza) y la fragilidad (susceptibilidad o sensibilidad a sufrir daño al estar expuesto ante un fenómeno amenazante). En términos matemáticos, esta vulnerabilidad se expresa y se evalúa mediante la siguiente relación:

$$V_i = E_i \cdot F_i \tag{1}$$

Donde *Vi* representa la vulnerabilidad del elemento *i* expuesto a la acción de un fenómeno natural amenazante, *Ei* representa la exposición del elemento ante el fenómeno amenazante y *Fi* es la fragilidad del elemento, que, a su vez, se expresa como:

$$F_i = \frac{P_{imp}}{\Sigma R_i} \tag{2}$$

Donde ΣRi corresponde a la sumatoria de la serie de factores o variables que representan la resistencia o la capacidad de resistencia del elemento *i* para soportar el impacto de la amenaza, y P_{imp} representa la magnitud, la intensidad o la presión de impacto del fenómeno natural amenazante.

Entonces, reemplazando (2) en (1) se tiene que, en términos generales, la vulnerabilidad se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V_i = E_i \cdot \left[\frac{P_{imp}}{\Sigma R_i}\right] \tag{3}$$

En el contexto de este trabajo, la resistencia se refiere a la falta de capacidad inherente de los elementos en la extensión espacial investigada para preservar su integridad física, económica, social y funcionalidad en el curso de la presión de impacto o interacción física con el fenómeno amenazante. Tal como lo proponen Du et al. (2014), se considera que $V \in [0, 1]$ es la vulnerabilidad de los elementos expuestos ante la amenaza, tal que 1 significa que el elemento será totalmente afectado o quedará completamente destruido y se derrumba para el caso de estructuras, mientras que los valores inferiores a 1 representan el grado de daño; $P_{imp} \in [0, 1]$ es la intensidad o presión de impacto del fenómeno amenazante, un valor de intensidad de 1 significa que este tiene un enorme potencial de daño y destruirá todos los elementos expuestos a su paso; $R \in [0,1]$ es la resistencia del elemento expuesto; $R = 0$ significa que el elemento vulnerable tiene una resistencia inherente muy alta respecto al impacto del fenómeno. V, P_{imp} y R se expresan en términos adimensionales (Du et al., 2014).

La ecuación (3) es compatible con la que propone Villagrán de León (2006), que expresa la vulnerabilidad de la siguiente manera:

$$\text{Vulnerabilidad} = \frac{\text{Exposición} \times \text{Susceptibilidad}}{\text{Capacidad de afrontamiento}} \tag{4}$$

Sin embargo, la gran diferencia entre estas dos expresiones radica en que en (4) la susceptibilidad se refiere a la sensibilidad del elemento expuesto para ser afectado, sin tener en cuenta el fenómeno impactante, por lo que pierde efectividad en las posibles medidas de prevención o mitigación, ya que el grado y el tipo de afectación difiere del fenómeno impactante; por ejemplo: no se sufren los mismos daños ante un terremoto que ante una inundación o una avenida torrencial, mientras que la ecuación (3), propuesta en el presente trabajo, supera tal inconveniente. En ambas ecuaciones la resistencia y las capacidades de afrontamiento o de respuesta se refieren a los medios por los que las personas u organizaciones utilizan los recursos y las capacidades disponibles para hacer frente a las consecuencias adversas relacionadas con un desastre (Villagrán de León, 2006).

La presión de impacto que indica el tipo de fenómeno amenazante, en este caso corresponde a la intensidad de la avenida torrencial o el flujo de detritos. Distintos autores han desarrollado ecuaciones para calcular la presión media de impacto por este tipo de amenaza natural, considerando componentes estáticos o dinámicos (Jakob et al., 2012). Sin embargo, la intensidad de flujo (IDF) es el índice más apropiado para representar la presión de impacto de este fenómeno, ya que puede manifestar las fuerzas que generan daños y, por tanto, puede correlacionarse con los daños en las infraestructuras y los elementos expuestos ante él. Dicho índice se calcula mediante la siguiente expresión (Jakob et al., 2012; Ramos et al., 2021; Bocanegra et al., 2023):

$$IDF = d_{max} \times V_{max}^2 \tag{5}$$

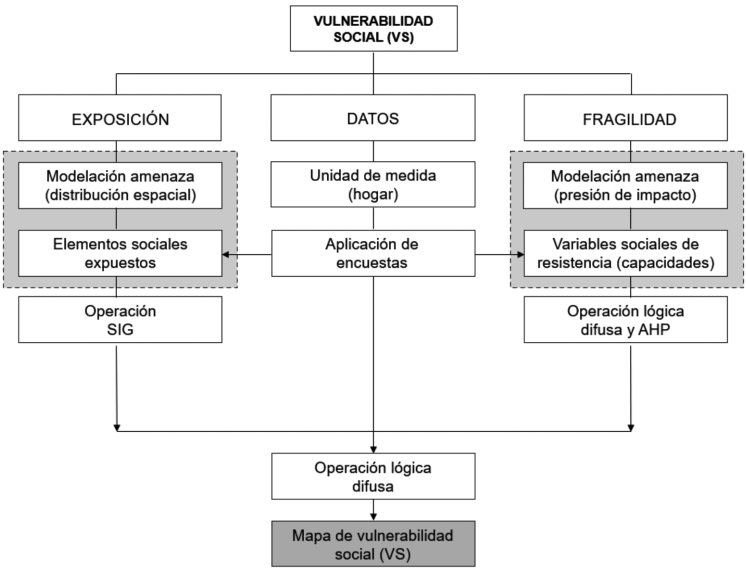
Donde *IDF* se mide en (m^3/s^2), d_{max} es la profundidad máxima del flujo (m) y V_{max} corresponde a la velocidad máxima del flujo (m/s).

En este trabajo la vulnerabilidad social se evalúa considerando la afectación sobre la condición de los MVS conformado por cinco tipos de capitales (natural, humano, físico, financiero y social), tal como lo propone el DFID. Para la espacialización de las variables y la asignación de los pesos respectivos, se utilizaron los sistemas de información geográfica (SIG) y la metodología de la lógica difusa (Lapietra et al., 2023), y el proceso de análisis jerárquico (AHP por su sigla en inglés); como unidad de análisis se toma el hogar. En la figura 3 se muestra el flujograma del proceso metodológico abordado en el presente trabajo.

Para realizar la evaluación mediante lógica difusa se utilizó el software GeoFis por ser de código abierto. Dicho software fue desarrollado por el INRA y el IRSTEA. Los pesos de cada dimensión se determinaron mediante el método AHP. La herramienta de lógica difusa se estructuró a través de un diagrama en cascada (figura 4).

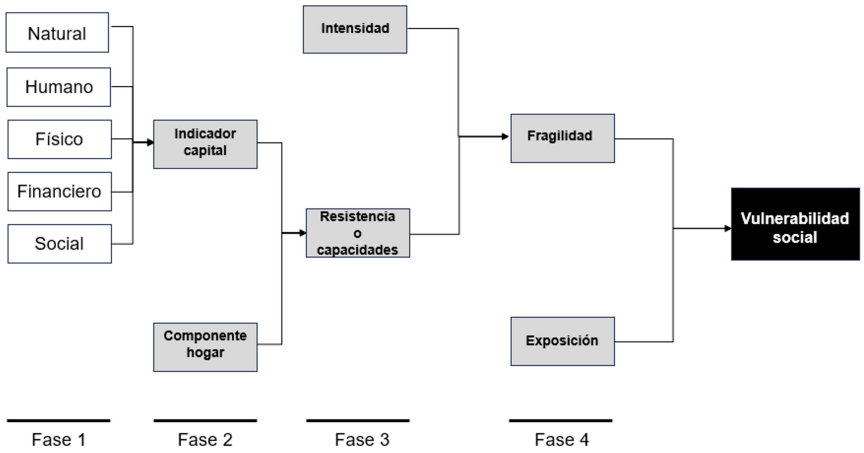
La vulnerabilidad social se conforma de las variables *fragilidad* y *exposición*. A la fragilidad se le asignó un peso de 0,6, ya que ejerce un impacto más directo y crítico en la vulnerabilidad general y la capacidad de recuperación del sistema. Para la exposición se le asignó un peso de 0,4, ya que su impacto puede ser mitigado en cierta medida a través de una adecuada planificación y gestión del riesgo. Para poder trabajar con la media aritmética ponderada (WAM), la suma de los pesos de estas dos dimensiones debe dar como resultado 1,0.

Figura 3. Flujograma de procesos para la evaluación de la vulnerabilidad social



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Cascada para la evaluación de la vulnerabilidad social usando lógica difusa



Fuente: elaboración propia.

5.2. Lógica difusa

Esta investigación empleó la metodología de la lógica difusa para analizar la vulnerabilidad social en la zona de estudio. Dicha herramienta permite representar la imprecisión de los datos mediante conjuntos difusos, los cuales asignan un grado de pertenencia a cada elemento en lugar de una clasificación binaria. Además, utiliza reglas difusas para modelar el conocimiento experto, estableciendo relaciones entre variables de forma lingüística o numérica. Una función de pertenencia de un conjunto A sobre un universo será de la forma (Zimmermann, 2001; Mendel, 2024):

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \tag{6}$$

Donde

$$\mu_A(x) = r, \text{si } r \text{ es el grado en que } x \text{ pertenece a } A \tag{7}$$

Los grados de pertenencia se calculan para cualquier x € [0, +∞) según la ecuación [7]:

$$\deg(x) = \begin{cases} 1 & if\ x \leq i \\ \dfrac{j-x}{j-i} & if\ i \leq x \leq j \\ 0 & if\ x \geq j \end{cases} \tag{8}$$

Las funciones características comúnmente más utilizadas por su simplicidad matemática son triangular y trapezoidal (Casal-Guisande et al., 2023).

Las reglas lingüísticas se utilizan dentro de los sistemas de inferencia difusa para el razonamiento aproximado. Se llama *reglas difusas* al conjunto de proposiciones «Si, entonces», que son condiciones para generar posibles resultados. El comportamiento de todo el sistema está determinado por la unión o la suma de todas ellas y se expresan con sentencias del tipo:

Si (condiciones_de_entrada), entonces (acción_a_ejecutar).

La lógica difusa permite integrar conocimiento cualitativo y cuantitativo, facilitando así la modelación de aspectos complejos que los enfoques matemáticos tradicionales no abordan fácilmente (Ross, 2016). Su núcleo es el mecanismo de inferencia, que toma decisiones a partir de reglas difusas y datos de entrada. Los sistemas más comunes son Mamdani, con salidas difusas, y Takagi-Sugeno, con salidas en forma de funciones lineales o constantes (Mendel, 2024). La salida del sistema difuso tipo Takagi-Sugeno se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Salida} = \frac{\sum_{i=1}^{n} WS[n]S[n]}{\sum_{i=1}^{n} WS[n]} \tag{9}$$

Donde n es el número de funciones de pertenencia de la salida, $WS[n]$ contiene el máximo entre las reglas que comparten la salida $S[n][\ldots]$.

Para los pesos del índice de vulnerabilidad social se utilizó, por un lado, la media aritmética ponderada (WAM), que se define de la siguiente manera:

$$(a_1, \ldots, a_n) = \sum_{i=1}^{n} w_i a_i \tag{10}$$

Donde:

$$w_i \in [0,1] \; and \sum_{i=1}^{n} w_i = 1. \tag{11}$$

Con este operador se asignan pesos a las diferentes variables, y la suma de todos los pesos debe dar como resultado 1.

5.3. Proceso analítico jerárquico (AHP)

Se utilizó el AHP, un método de toma de decisiones multicriterio desarrollada por Saaty (1980). Este método permite establecer prioridades dividiendo un

problema en una jerarquía de criterios y alternativas, realizando comparaciones pares y sintetizando los resultados. A través de una matriz de comparación de $n \times n$, el AHP asigna valores según la importancia de cada criterio.

El AHP utiliza la escala de Saaty del 1 al 9. Además, se debe presentar cierta consistencia en el proceso. La ecuación del índice de consistencia (CI) para cada criterio es la siguiente:

$$CI = \frac{\lambda max - n}{n - 1} \tag{12}$$

Donde λmax es el máximo autovalor y n es la dimensión de la matriz de decisión.

Además, se debe determinar el índice aleatorio (*IA*) para calcular la razón de consistencia (*CR*), que se corresponde a:

$$IA = \frac{1{,}98(n-2)}{n} \tag{13}$$

La relación de consistencia (*CR*) se establece mediante la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{CI}{IA} \tag{14}$$

Al calcular *CR* se obtiene un valor menor o igual a 0,1 que determina que el nivel de inconsistencia es aceptable. Con un resultado contrario se recomienda que el tomador de decisiones revise su evaluación (Mendoza et al., 2019).

6. Resultados

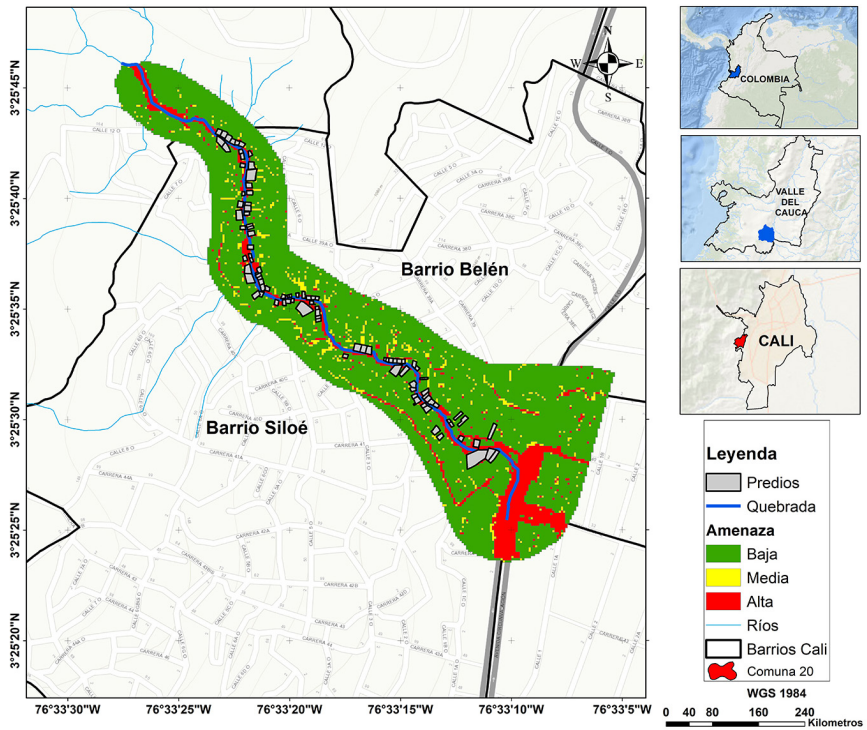
6.1. Modelación de la amenaza por avenida torrencial

En la figura 5 se presenta el mapa de amenaza por avenida torrencial en la quebrada Isabel Pérez de la ciudad de Cali (CVC y Univalle, 2020). Espacialmente, los niveles más altos de amenaza se encuentran sobre el entamboramiento de la quebrada y en la parte plana, donde se acumula el flujo debido al cambio de pendiente.

6.1.1. Análisis de los elementos sociales expuestos y grado de exposición

El área de estudio cuenta con 214 predios, de los cuales 127 están ubicados en zonas definidas como de amenaza alta y 87 en zonas de amenaza baja frente al fenómeno de avenida torrencial, todos localizados a lo largo de las márgenes de la quebrada Isabel Pérez, entre los barrios Belén y el sector San Francisco en Siloé. No obstante, 6 predios ubicados en zonas de amenaza alta corresponden al barrio de El Lido y fueron excluidos del análisis, quedando así 121 predios en zona de amenaza alta considerados en este estudio. Cabe aclarar que, para este análisis, cada predio equivale a una edificación. La caracterización de los

Figura 5. Mapa de amenaza por avenida torrencial en la zona de estudio



Fuente: CVC y Univalle (2020).

elementos sociales expuestos en zonas de amenaza alta se basó en la teoría de los MVS. La tabla 2 presenta el componente hogar, los capitales que conforman los MVS y sus dimensiones, siguiendo y adaptando los lineamientos del DFID a la realidad territorial.

En cuanto a la intensidad del fenómeno, 116 edificaciones se encuentran en nivel alto; 5, en nivel medio, y 6, en nivel bajo, totalizando 127 edificaciones. Por otra parte, tres predios ubicados en los barrios Nueva Granada y El Lido no pudieron ser excluidos de este conteo general, aunque fueron descartados en el análisis específico de intensidad por hogar. Respecto al nivel de exposición, 92 edificaciones están en nivel alto; 29, en nivel medio, y 6, en nivel bajo, sumando también 127 edificaciones. Sin embargo, los predios de Nueva Granada y El Lido fueron excluidos, por lo que el análisis final se realizó con 124 edificaciones localizadas en los barrios de Siloé y Belén.

6.1.2. Análisis de la presión de impacto

El análisis de la presión de impacto por avenida torrencial se realizó considerando parámetros clave, como la velocidad del flujo, que varía entre 0 y 7 m^3/seg;

la profundidad, que oscila entre 0 y 6 metros, y un período de retorno de 100 años. Estos valores fueron determinados a partir de los resultados obtenidos mediante la modelación hidráulica (CVC y Univalle, 2020).

Se identificó que los niveles más altos de peligro se concentran en puntos críticos, como el entamboramiento de la quebrada, donde el flujo se ve restringido, y en las zonas de acumulación de agua, que suelen ubicarse en áreas planas con cambios en la pendiente. En estas regiones de mayor impacto, la interacción entre la velocidad del flujo y la profundidad del agua desempeña un papel fundamental en la magnitud del fenómeno. Las zonas donde el flujo alcanza velocidades más elevadas tienden a sufrir mayor erosión y arrastre de material sólido, mientras que en las áreas de menor pendiente se produce una acumulación de sedimentos, lo que incrementa la presión sobre el terreno y las estructuras circundantes.

6.2. Fragilidad: Análisis de resistencia o capacidades

De los 124 predios se encuestaron 97 hogares, considerando que en 12 hogares no fue posible contactar con ninguna persona, 10 predios no existían (derribadas) o estaban asociados con otros predios, dos hogares fueron reubicados y tres casas estaban desocupadas. En la tabla 3 se presenta el análisis realizado para cada uno de los capitales de los MVS y del componente hogar.

6.3. Determinación de la vulnerabilidad social

Para la clasificación de la vulnerabilidad social se usaron tres rangos (bajo, medio y alto) obtenidos por medio del software ArcGIS con su herramienta de Natural Breaks (tabla 4). Esta clasificación se basa en agrupaciones naturales presentes en los datos, donde las rupturas de clase se definen para maximizar las diferencias entre ellas y mejorar la agrupación de valores similares. Este enfoque divide las entidades en clases con límites o rangos establecidos donde existen diferencias significativas en los valores de los datos. Este método resulta útil para representar valores de datos que no están distribuidos equitativamente.

Tomando en cuenta los rangos anteriores, se generaron los resultados finales de vulnerabilidad. La tabla 5 presenta los medios de vida sostenibles de los 10 hogares más vulnerables ante la ocurrencia del fenómeno de avenida torrencial, además del hogar con menores capacidades de respuesta frente a la ocurrencia de un evento (número 16). Respecto a este último hogar, al relacionarlo con la intensidad del fenómeno y la exposición de los elementos, se identifica que ambas variables están en un alto rango de impacto, que, sumado a la medición de los medios de vida sostenible, agudiza su vulnerabilidad social. Es decir, es un hogar conformado por dos personas, una de ellas mayor de 70 años, las cuales viven en el sector hace más de 10 años y, aunque llegaron por desplazamiento, actualmente reconocen las causas y los impactos asociados al fenómeno de avenida torrencial y saben cómo actuar frente a la ocurrencia de este.

Tabla 3. Resultados capitales

Componentes	Resultados
Componente hogar	El 25% de hogares tiene 4 integrantes, y el 24%, cinco o más; el 52% representa a menores de 5 o mayores de 70 años; el 68% vive allí hace más de 10 años; el 83% está formado por propietarios o nativos; el 10%, por recién llegados; el 7%, por desplazados, y el 3% ha migrado.
Capital natural	El 95% identifica problemas ambientales (tala, deslizamientos, inundaciones), el 92% ha sido afectado directamente y el 23% destaca la pérdida de vidas.
Capital humano	El 97% ha presenciado desastres; el 55% recibió capacitación y el 37%, no; el 72% sabe actuar y el 28% no sabe. El 38% trabaja por cuenta propia y el 28% está desempleado. El 67% de jefes de hogar son mujeres, y el 33%, hombres. En cuanto a educación: el 48% tiene estudios primarios; el 40%, secundarios; el 10% no tiene estudios, y el 2% cuenta con formación superior. El 28% tiene discapacidad (el 12% física, el 7% visual y el 6% auditiva). Acerca de las diversas creencias: el 57% es religiosa; el 10%, religiosa y científica; el 8%, científica, y el 25% no cree.
Capital físico	El 36% solamente camina, el 32% usa transporte público y el 27% tiene vehículo. El 70% posee vivienda, pero el 86% es de mampostería no reforzada. El 55% solo cuenta con acueducto y energía, el 28% tiene además internet y recolección de residuos. El alcantarillado es precario. El 50% tiene tres o cuatro bienes del hogar, y el 26%, cinco o más. En tecnología, el 62% tiene celular y TV; el 19%, solo celular, y el 14%, también computador.
Capital financiero	El 46% tiene ingresos iguales a sus gastos, el 34% gana menos, y solo el 10% gana más. El 86% no tiene ingresos adicionales, y el 12% cuenta con extras como trabajos, alquiler o remesas. El 73% no ahorra y el 27% lo hace con alcancías o fondos. El 51% recibe subsidios, principalmente Sisbén, ingresos solidarios o bonos para adultos mayores.
Capital social	El 43% no reconoce redes de apoyo; el 39% identifica una, y el 18%, dos o más. El 72% conoce instituciones de respuesta (DAGMA, bomberos, Cruz Roja). También el 72% accede a información sobre la quebrada Isabel Pérez, mayormente por voz a voz (el 75%) y redes sociales (el 60%).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Rangos establecidos para las dimensiones para valoración de la vulnerabilidad social

Dimensiones	Bajo	Medio	Alto
Capital natural	0,092 - 0,36	0,36 - 0,73	0,73 - 1,00
Capital humano	0,262 - 0,51	0,51 - 0,69	0,69 - 0,91
Capital físico	0,12 - 0,27	0,27 - 0,42	0,42 - 0,65
Capital financiero	0,23 - 0,24	0,24 - 0,76	0,76 - 1,00
Capital social	0	0,001 - 0,5	0,50 - 1
Componente hogar	0 - 0,21	0,21 - 0,49	0,49 - 0,78
Vulnerabilidad social	0,14 - 0,40	0,41 - 0,60	0,61 - 0,89

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resultados de la vulnerabilidad social frente a la amenaza por avenida torrencial en el área de estudio

Núm.	Vulnerabilidad social	Indicador capital	Capital natural	Capital humano	Capital físico	Capital financiero	Capital social
1	0,893	0,682	0,500	0,681	0,458	1,000	1,000
2	0,870	0,640	0,500	0,669	0,316	1,000	1,000
3	0,848	0,710	0,668	0,762	0,379	1,000	1,000
4	0,845	0,547	0,500	0,514	0,431	0,564	1,000
5	0,819	0,624	0,500	0,631	0,492	1,000	0,500
6	0,815	0,568	0,615	0,650	0,395	1,000	0,000
7	0,804	0,556	0,575	0,474	0,411	1,000	0,500
8	0,799	0,780	0,639	0,908	0,651	1,000	0,500
9	0,795	0,479	0,500	0,399	0,483	0,619	0,500
10	0,788	0,532	1,000	0,494	0,408	0,494	0,500
16	0,779	0,735	0,871	0,825	0,486	1,000	0,500

Fuente: elaboración propia.

El jefe del hogar estudió hasta primaria, y aunque cuenta con el subsidio del gobierno y el bono para el adulto mayor, los ingresos del hogar son iguales a los gastos y debe tener un trabajo suplementario.

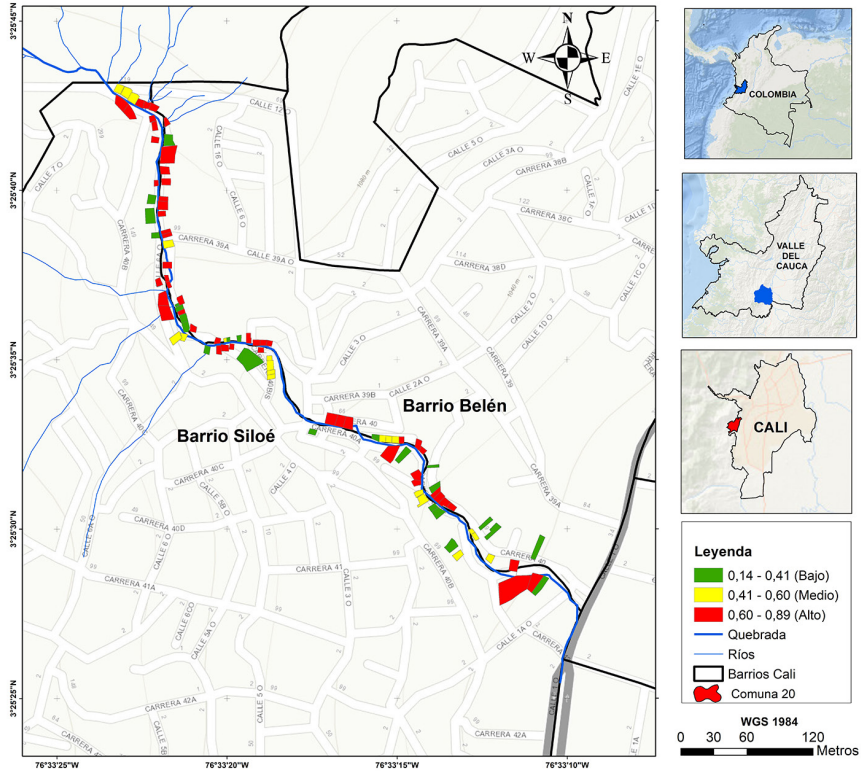
El capital financiero es el más afectado en los hogares encuestados, con un 80% que presenta ingresos iguales o inferiores a sus gastos; solo el 15% cuenta con otras fuentes de ingresos y el 27% tiene capacidad de ahorro mediante alcancías o cadenas familiares y sociales. El capital físico es el segundo más vulnerable, con un 67% de viviendas construidas con materiales precarios y un 36% con limitaciones en sus medios de transporte.

Solo tres hogares tienen más de 10 integrantes, de los cuales dos presentan alta vulnerabilidad social, y uno, nivel medio. Además, el 15% de los habitantes son desplazados o migrantes, y el 47% de ellos muestra alta vulnerabilidad social. De los 97 hogares encuestados, solo 8 tienen alta capacidad de respuesta ante una avenida torrencial, asociada principalmente a los capitales financiero y físico. Otros 41 hogares presentan resistencia media vinculada al capital social y natural, mientras que en 48 hogares se ven capacidades bajas; 28 de estos últimos tienen alta vulnerabilidad social y deben ser priorizados en futuras intervenciones. En total, el 49% de los hogares tiene baja capacidad de respuesta.

6.4. Mapa de vulnerabilidad social

Se elaboró un mapa de vulnerabilidad social (figura 6) que identifica la ubicación exacta de los elementos sociales expuestos ante avenidas torrenciales en la quebrada Isabel Pérez, Santiago de Cali. En este mapa, 52 hogares presentan alta vulnerabilidad; 20, media, y 25, baja. El mapa de vulnerabilidad social muestra que el 52% de los hogares con alta vulnerabilidad

Figura 6. Mapa de la vulnerabilidad social frente a la amenaza por avenida torrencial en la zona de estudio



Fuente: elaboración propia.

están ubicados principalmente en la parte alta de la quebrada Isabel Pérez; el 31%, en la parte media baja, y el 17%, en la parte media alta. En cuanto a los hogares con vulnerabilidad media, el 45% se localiza en la parte media y baja del entamboramiento; el 40%, en la parte media, y el 15% restante, en la parte alta. Los hogares con vulnerabilidad baja se distribuyen mayormente a lo largo del entamboramiento de la quebrada. Las capacidades de los hogares se encuentran distribuidas en tres niveles: alto (un 30%), medio (un 30%) y bajo (un 40%). No obstante, la intensidad del evento es mayormente alta, lo que genera una fragilidad elevada, factor que pesa más en la determinación del nivel de vulnerabilidad social. Aunque un 40% de hogares presenta una baja exposición, la fragilidad predominante influye directamente en aumentar su vulnerabilidad. Finalmente, de los 97 hogares encuestados; 52 presentan una alta vulnerabilidad social; 20 tienen un nivel medio, y 25, bajo.

7. Medidas de mitigación

Las acciones implementadas por la Secretaría Municipal para la Gestión del Riesgo (SMGRED) en la quebrada Isabel Pérez constituyen un primer acercamiento necesario, aunque aún insuficiente para enfrentar de manera integral la amenaza asociada a las avenidas torrenciales. Las intervenciones sobre el cauce, como la limpieza, la descolmatación y el mantenimiento de la capacidad hidráulica, son medidas indispensables. Asimismo, estudios sobre gestión comunitaria destacan que las campañas de educación y la conformación de comités locales pueden fortalecer la prevención, pero su eficacia depende de su continuidad y del acompañamiento institucional (GNDR, 2015).

En cuanto a las medidas estructurales, la recuperación del cauce natural y la reubicación de viviendas en zona de amenaza alta son intervenciones necesarias para restablecer la dinámica hidromorfológica y reducir la exposición. Sin embargo, diversos autores advierten que estos procesos enfrentan tensiones sociales, resistencia comunitaria y limitaciones presupuestales que pueden retrasar o impedir su ejecución (Lizarralde et al., 2014). La construcción de embalses en línea también ha sido cuestionada por presentar restricciones ambientales y por generar una falsa sensación de seguridad que favorece la ocupación de zonas de riesgo (UNDRR, 2022).

Además, diversos estudios coinciden en afirmar que la eficacia de las medidas no estructurales depende de su articulación con instrumentos de planificación territorial y políticas de gestión ambiental que operen de manera coherente en distintas escalas de gobierno. En ciudades latinoamericanas, esta articulación suele verse limitada por la fragmentación institucional, la superposición de competencias y la ausencia de mecanismos permanentes de actualización de la información técnica, lo cual dificulta que herramientas como los mapas de amenaza o los lineamientos de protección hídrica se traduzcan en acciones concretas de control del uso del suelo (UNGRD, 2020). Investigaciones recientes también señalan que el reconocimiento jurídico de los sistemas hídricos y la promoción de soluciones basadas en la naturaleza requieren acompañarse de procesos de gobernanza participativa que integren a comunidades locales, autoridades ambientales y entidades de gestión del riesgo, dado que la sostenibilidad de estas medidas depende de su apropiación social y del fortalecimiento institucional a largo plazo (Seddon et al., 2020). En este sentido, varios autores subrayan que las medidas no estructurales no deben asumirse únicamente como complementarias, sino como componentes estratégicos dentro de un enfoque integral de reducción del riesgo que combine regulación, participación y manejo adaptativo del territorio (Zevenbergen et al., 2020).

En el presente trabajo se considera importante priorizar un conjunto de acciones integrales que permitan fortalecer la gestión del riesgo por avenidas torrenciales en la quebrada Isabel Pérez. En primer lugar, se considera fundamental consolidar un programa permanente de mantenimiento y restauración del cauce que trascienda las intervenciones puntuales de limpieza y avance hacia la recuperación de la morfología natural y de la vegetación de ribera. Este

enfoque, complementado con soluciones basadas en la naturaleza, contribuiría a mejorar la capacidad hidráulica del cauce y a reducir la acumulación de material inestable, garantizando intervenciones más sostenibles a largo plazo.

En segundo término, la necesidad de priorizar procesos de reubicación concertada para las viviendas localizadas en zonas de amenaza alta, dado que concentran niveles críticos de exposición y vulnerabilidad. Reconocemos que estos procesos suelen enfrentar restricciones sociales y económicas, por lo que proponemos que se desarrollen con garantías de inclusión social y acompañamiento institucional.

Desde el componente no estructural, se considera esencial fortalecer los mecanismos locales de gobernanza del riesgo, mediante la consolidación de comités comunitarios y procesos formativos continuos que permitan mejorar la percepción del riesgo y promover prácticas preventivas sostenidas. En concordancia con lo señalado por diversos estudios, estas instancias pueden incrementar la eficacia de las medidas si cuentan con continuidad y articulación interinstitucional. Es prioritario asegurar que la información técnica generada, incluidos los mapas de amenaza actualizados y los indicadores de vulnerabilidad, sea incorporada de manera efectiva en los instrumentos de ordenamiento territorial y en la planificación ambiental municipal.

Por último, es importante promover procesos de gobernanza participativa y de manejo adaptativo del territorio, que articulen a la comunidad, a la SMGRED y a las autoridades ambientales. Esta articulación permitiría no solo aumentar la eficacia de las intervenciones, sino también garantizar su sostenibilidad, coherencia y apropiación social, elementos indispensables para una gestión del riesgo integral en la quebrada Isabel Pérez.

8. Discusión

La literatura coincide en afirmar que la vulnerabilidad social constituye un componente central del riesgo, al reflejar la susceptibilidad de los grupos sociales a sufrir pérdidas estructurales y no estructurales ante fenómenos extremos (Cutter, 1996). Los resultados obtenidos en esta investigación se alinean con dicha perspectiva, al mostrar que las características socioeconómicas y las condiciones de vida de los hogares influyen de manera significativa en su nivel de exposición y afectación potencial.

El enfoque clásico planteado por Pizarro (2001) resulta útil para interpretar los hallazgos del estudio, especialmente al considerar la vulnerabilidad como una condición dual: por un lado, como la inseguridad e indefensión que enfrentan las personas ante eventos traumáticos y, por otro, como la capacidad de gestionar recursos y estrategias para enfrentar dichos impactos. En el caso de los hogares analizados, las limitaciones en capital humano, físico y social refuerzan esa condición de indefensión estructural identificada por el autor. Asimismo, los resultados son consistentes con la aproximación de Cannon (1993), quien plantea que la evaluación de la vulnerabilidad debe centrarse en el modo en que los elementos sociales pueden ser dañados y en la capacidad para resistir

dicho daño. Los componentes que este autor identifica como medios de subsistencia, bienestar, autoprotección, protección social y gobernanza se reflejan claramente en las debilidades detectadas en los hogares estudiados. Esto sugiere que, más allá de la amenaza física, son las desigualdades socioeconómicas y la fragilidad institucional las que determinan la magnitud del impacto.

Sin embargo, como lo señalan Tuccillo y Spielman (2022), uno de los principales desafíos de los modelos de vulnerabilidad social radica en la insuficiente comprensión del contexto local y de los efectos diferenciados que sufrirían los grupos expuestos. Este estudio confirma dicha observación: la vulnerabilidad no es homogénea entre los hogares, sino que está modulada por variables como la calidad de la vivienda, el acceso a recursos económicos y las redes de apoyo comunitario. La falta de información contextualizada puede llevar a interpretaciones incompletas sobre la capacidad real de respuesta y recuperación de la población.

Estas perspectivas permiten comprender que la vulnerabilidad social es un fenómeno multidimensional y profundamente arraigado en las inequidades preexistentes. Los resultados obtenidos reafirman la necesidad de abordar la vulnerabilidad no solo desde indicadores cuantitativos, sino también desde una comprensión cualitativa de los procesos sociales que la generan y la reproducen. De este modo, los marcos conceptuales de Cutter (1996), Pizarro (2001) y Cannon (1993) proporcionan una base sólida para interpretar los patrones observados, mientras que las advertencias de Tuccillo y Spielman (2022) enfatizan la importancia de avanzar hacia modelos que integren mejor las realidades locales y las trayectorias históricas de los territorios.

En este trabajo la vulnerabilidad social se evalúa considerando la afectación sobre la condición de los medios de vida sostenible, para ello se ha propuesto una expresión matemática que involucra la exposición de los elementos, su resistencia o sus capacidades y la presión de impacto del fenómeno amenazante, avenida torrencial, aspecto no considerado en otros estudios (Cutter et al., 2003; Cutter, 2024). La incorporación del proceso analítico jerárquico (AHP) con lógica difusa permitió reducir la subjetividad en la ponderación de variables, lo cual responde a recomendaciones metodológicas ampliamente discutidas en el campo de la evaluación de la vulnerabilidad social (Fekete, 2012).

Los resultados de esta investigación evidencian que las avenidas torrenciales en la quebrada Isabel Pérez constituyen un riesgo recurrente para los hogares asentados en las laderas del occidente de Santiago de Cali. Este patrón coincide con estudios previos que han documentado cómo la combinación de condiciones geomorfológicas, ocupación informal y deficiencias en la gestión del territorio incrementan la susceptibilidad a eventos torrenciales en ciudades andinas (Hungr et al., 2014). De manera concordante, investigaciones recientes han demostrado que el relieve y las particularidades morfométricas condicionan fuertemente la peligrosidad hidrológica en cuencas de montaña y contribuyen a generar flujos de alta energía capaces de producir daños significativos (Moretto et al., 2024).

El hallazgo de que más del 50% de los hogares presentan una vulnerabilidad alta es consistente con investigaciones realizadas en la Comuna 20 de Cali

(Alcaldía de Santiago de Cali, 2021), donde las viviendas con baja calidad estructural, el hacinamiento y la limitación de recursos económicos son factores determinantes en el aumento del riesgo social.

Desde la perspectiva de medios de vida sostenible, los resultados muestran que el capital financiero y el capital físico son los más deteriorados, coincidiendo con hallazgos en otras comunidades vulnerables de Colombia y América Latina, donde la precariedad económica limita la capacidad de adaptación y reduce las opciones de recuperación posevento (Chambers y Conway, 1992). La alta proporción de viviendas en mampostería no reforzada (un 67%) es un factor crítico, ya que este tipo de estructuras ha sido identificado como particularmente susceptible ante esfuerzos hidrodinámicos y procesos de socavación en eventos torrenciales (Jakob y Hungr, 2005).

La literatura enfatiza que las medidas estructurales, como la recuperación del cauce y la construcción de estructuras de retención o disipación de energía, deben complementarse con estrategias no estructurales, tales como el fortalecimiento comunitario, la educación en gestión del riesgo y el ordenamiento territorial efectivo (UNDRR, 2019; Alcaldía de Santiago de Cali, 2021). En los últimos años, además, las soluciones basadas en la naturaleza han sido reconocidas como alternativas eficaces y sostenibles para la reducción del riesgo de inundación, la estabilización de laderas y la mitigación de los impactos de eventos extremos, especialmente en contextos urbanos con condiciones geomorfológicas complejas (Ribas Palom y Saurí Pujol, 2022). Experiencias locales en las cuencas de los ríos Cali y Meléndez demuestran que las obras físicas son efectivas solo cuando se acompañan de gobernanza, mantenimiento y compromisos comunitarios sostenidos (CVC, 2019).

A pesar de que la combinación de modelación hidráulica, análisis espacial y lógica difusa permitió obtener una estimación detallada de la vulnerabilidad social por hogar, el estudio presenta una limitación inherente a la propia naturaleza de estos métodos. La lógica difusa y el AHP dependen en buena medida de juicios de expertos para la asignación de pesos y la definición de funciones de pertenencia, pero, aunque estos procedimientos reducen la subjetividad, no la eliminan por completo. Esto implica que pequeñas variaciones en la percepción experta o en la estructura de los conjuntos difusos pueden generar modificaciones apreciables en los resultados finales. Asimismo, la modelación hidráulica se basa en condiciones hidrológicas y topográficas estáticas obtenidas en un momento específico, lo que no contempla completamente la dinámica temporal del cauce, la variabilidad climática ni la evolución de la ocupación del territorio. En este sentido, diversos estudios han señalado que el cambio climático está modificando los regímenes hidrológicos y aumentando las incertidumbres asociadas a la frecuencia y a la intensidad de eventos extremos, lo que plantea desafíos adicionales para la gestión del riesgo (Benito et al., 2022). En consecuencia, aunque los resultados son robustos para el contexto analizado, deben interpretarse con cautela al extrapolarlos a escenarios futuros o a condiciones ambientales significativamente distintas.

9. Conclusiones

Esta investigación evaluó el impacto de las avenidas torrenciales de la quebrada Isabel Pérez en los medios de vida sostenible de 97 hogares en Santiago de Cali, Colombia, proporcionando un precedente innovador para modelar la vulnerabilidad ante este tipo de eventos naturales.

Los niveles de vulnerabilidad social identificados fueron: 52 hogares con nivel alto, 20 con nivel medio y 25 con nivel bajo. Espacialmente, el 52% de los hogares con alta vulnerabilidad se ubican en la parte alta de la quebrada; el 31%, en la parte media baja, y el 17%, en la parte media alta. Los hogares con vulnerabilidad media se encuentran en su mayoría en la parte media y baja del entamboramiento de la quebrada, mientras que los de vulnerabilidad baja se distribuyen a lo largo del entamboramiento.

La evaluación integral de la vulnerabilidad ante avenidas torrenciales en la quebrada Isabel Pérez permitió identificar las condiciones de exposición y fragilidad social que enfrentan los hogares asentados en su zona de influencia. Los resultados revelan que más de la mitad de los hogares analizados presenta niveles altos de vulnerabilidad, producto de una combinación de factores estructurales, socioeconómicos y ambientales que incrementan su fragilidad frente a estos eventos. La predominancia de viviendas con materiales precarios, la limitada capacidad financiera de los hogares, el envejecimiento de la población y la alta incidencia de desplazamiento y migración configuran un escenario en el que las capacidades de respuesta son insuficientes para contrarrestar la magnitud del fenómeno.

Desde la perspectiva de medios de vida sostenibles, se evidencia que los capitales financiero y físico son los más deteriorados, lo que limita la resiliencia comunitaria y profundiza el impacto de las avenidas torrenciales. Estos resultados subrayan la importancia de fortalecer capacidades mediante estrategias integrales que combinen intervenciones estructurales como la recuperación del cauce natural y la mejora de la infraestructura hidráulica con acciones no estructurales orientadas a la educación, la planificación del uso del suelo, el fortalecimiento institucional y la apropiación comunitaria del territorio.

Esta investigación proporciona un insumo fundamental para la toma de decisiones en la gestión del riesgo en la quebrada Isabel Pérez. Los hallazgos evidencian la necesidad de avanzar hacia un enfoque articulado, interdisciplinario y territorialmente contextualizado que permita reducir la vulnerabilidad social de los hogares, aumentar su resiliencia y mitigar de manera efectiva los impactos futuros de las avenidas torrenciales en Santiago de Cali.

Acrónimos

AHP – Proceso analítico jerárquico (sigla en inglés de Analytic Hierarchy Process).
CVC – Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística (Colombia).
EPM – Método del potencial de erosión.
IDF – Índice de intensidad de flujo.

IFFP – Índice de potencial de inundación repentina.
MVS – Medios de vida sostenible.
SGC – Servicio Geológico Colombiano.
SIG – Sistema de información geográfica.
DFID – Departamento para el Desarrollo Internacional del Reino Unido.
INRA – Instituto Nacional para la Investigación Agronómica.
IRSTEA – Instituto Nacional de Investigación en Ciencia y Tecnología para la Agricultura y el Medio Ambiente.
DAGMA – Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente.
IPCC – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
SMGRED – Secretaría Municipal para la Gestión del Riesgo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente colombiano, perteneciente a la Universidad del Valle, Colombia (OSSO), el apoyo y la colaboración para la realización de este trabajo. Expresamos sinceros agradecimientos a los revisores anónimos, quienes, con sus comentarios y sugerencias, contribuyeron a mejorar la calidad y la presentación del manuscrito.

Referencias bibliográficas

Akram-Lohdi, Haroon (2011). «El enfoque de los medios de vida sostenible». En: Veltmeyer, Henry (coord.). *Herramientas para el cambio: Manual para los estudios críticos del desarrollo*. La Paz: Plural Editores, 191-196.

Alcaldía de Santiago de Cali (2008). *Plan de Desarrollo 2008-2011. Comuna 20*, 3-4.

— (2021). *Informe de gestión del riesgo en cuencas de ladera*. DAPM.

Audemard, Franck A.; Santis, Federico de; Montes, Luis; Lugo, Miguel y Singer, Alfredo (1989). «El alud torrencial del 06-09-1987 del río El Limón, al norte de Maracay, Estado Aragua». *Geos*, 29, 250-260.

Benito, Gerardo; Beneyto, Carlos; Aranda, José Ángel; Machado, María J.; Francés, Félix; Sánchez-Moya, Yolanda (2022). «Inundaciones y cambio climático: Certezas e incertidumbres en el camino a la adaptación». *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*, 107, 191-216. <https://doi.org/10.7203/CGUV.107.21424>

Betancourt-Suárez, Valentina; García-Botella, Enrique y Ramon-Morte, Ana (2021). «Flood Mapping Proposal in Small Watersheds: A Case Study of the Rebollos and Miranda Ephemeral Streams (Cartagena, Spain)». *Water*, 13(1), 102. <https://doi.org/10.3390/w13010102>

Bocanegra, R. A.; Ramírez, C. A.; Salcedo, E. D. J. y Villegas, M. P. L. (2023). «Determination of Hazard Due to Debris Flows». *Water*, 15(23), 4057. <https://doi.org/10.3390/w15234057>

Cannon, Terry (1993). «A hazard need not a disaster make: Vulnerability and the causes of natural disasters». En: Merriman, P. A. y Browitt, C. W. A. (eds.). *Natural Disasters: Protecting Vulnerable Communities. Proceedings of the Conference Held in London, 13-15 October 1993*. Londres: Thomas Telford, 92-105. <https://doi.org/10.1680/ndpvc.19362.0008>

Casal-Guisande, M.; Cerqueiro-Pequeño, J.; Bouza-Rodríguez, J.-B. y Comesaña-Campos, A. (2023). «Integration of the Wang & Mendel Algorithm into the Application of Fuzzy Expert Systems to Intelligent Clinical Decision Support Systems». *Mathematics*, 11(11), 2469. <https://doi.org/10.3390/math11112469>

Catto, J. L. y Dowdy, A. (2021). «Understanding compound hazards from a weather system perspective». *Weather and Climate Extremes*, 32, 100313. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100313>

Chambers, Robert y Conway, Gordon R. (1992). *Sustainable rural livelihoods: Practical concepts for the 21st century*. IDS Discussion Paper, 296. Institute of Development Studies.

Chen, H. W. y Chen, C. Y. (2022). «Warning Models for Landslide and Channelized Debris Flow under Climate Change Conditions in Taiwan». *Water*, 14(5), 695. <https://doi.org/10.3390/w14050695>

Congreso de la República de Colombia (2012). «Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones». *Diario Oficial* (24 de abril), 48.411.

Coussot, P. y Meunier, M. (1996). «Recognition, classification and mechanical description of debris flows». *Earth-Science Reviews*, 40(3-4), 209-227. <https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8>

Cutter, Susan L. (1996). «Vulnerability to environmental hazards». *Progress in Human Geography*, 20(4), 529-539. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>

— (2024). «The Origin and Diffusion of the Social Vulnerability Index (SoVI)». *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 109, 104576. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104576>

Cutter, Susan L.; Boruff, B. J. y Shirley, W. L. (2003). «Social vulnerability to environmental hazards». *Social Science Quarterly*, 84(2), 242-261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>

Cutter, S. L. y Morath, D. P. (2013). «The evolution of the Social Vulnerability Index (SoVI)». En: Birkmann, J. (ed.). *Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies*. United Nations University, 304-321.

CVC – Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2019). *Evaluación regional del agua*. Cali: CVC.

CVC y Universidad del Valle (2019). *Geología y geomorfología de la cuenca quebrada Isabel Pérez en el municipio Santiago de Cali* [Informe interno]. Cali, Colombia.

— (2020). *Resumen técnico final del estudio de evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y escenarios de afectación por avenida torrencial e inundación fluvial y pluvial por la quebrada Isabel Pérez* [Informe interno]. Cali, Colombia.

DFID (2001). *Hojas orientativas sobre los medios de vida sostenibles*. <https://www.livelihoodscentre.org/es/-/sustainable-livelihoods-guidance-sheets>

Dragićević, Slavoljub; Kostadinov, Stanimir; Novković, Ivan; Momirović, Natalija; Langović, Marko; Stefanović, Tomislav y Radović, Mirjana (2022). «Assessment of soil erosion and torrential flood susceptibility: Case study – Timok River Basin, Serbia». En: A. Negm, L. Zaharia y G. Ioana-Toroimac (Eds.). *The Lower Danube River*. Cham: Springer, 357-380. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-03865-5_12>

Du, Jianting; Yin, Kunlong; Lacasse, Suzanne y Nadim, Farrokh (2014). «Quantitative vulnerability estimation of structures for individual landslide: Application to the metropolitan area of San Salvador, El Salvador». *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19(4), 1251-1264.

Evans, Stephen G.; Bishop, Nicholas F.; Smoll, Fidel P.; Valderrama Murillo, Patricio; Delaney, Keith B. y Oliver-Smith, Anthony (2009). «A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970». *Engineering Geology*, 108, 96-118. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.020>

Fekete, Alexander (2012). «Spatial disaster vulnerability and risk assessments: Challenges in their quality and acceptance». *Natural Hazards*, 61(3), 1161-1178.

Fitton, John M.; O'Dwyer, Barry y Maher, Brendan (2021). «Developing a social vulnerability to environmental hazards index to inform climate action in Ireland». *Irish Geography*, 54(2), 157-180. <https://doi.org/10.55650/igj.2021.1464>

García-Acosta, Virginia (2005). «El riesgo como construcción social y la construcción social de riesgos». *Desacatos*, 19, 11-24.

GNDR – Global Network of Civil Society Organisations for Disaster Reduction (2015). *Frontline: Community perspectives on disaster risk*. Londres: GNDR.

Gómez-Cardona, Felipe; Aristizábal-Giraldo, Edier; Arango, María Isabel y Mergili, Martin (2021). «Regional and detailed multi-hazard assessment of debris-flow processes in the Colombian Andes». *EGU General Assembly 2021*, EGU21-13139. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13139>

Gomi, Takashi; Sidle, Roy C. y Richardson, John S. (2002). «Understanding processes and downstream linkages of headwater systems». *BioScience*, 52(10), 905-916.

Gottret, M. V. (2011). *El enfoque de medios de vida sostenibles: Una estrategia para el diseño e implementación de iniciativas para la reducción de la pobreza*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Hungr, Oldrich (2005). «Classification and terminology». En: Jakob, Matthias y Hungr, Oldrich (eds.). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlín: Springer Praxis Books / Springer Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_2>

Hungr, Oldrich; Lerouil, Serge y Picarelli, Luciano (2014). «The Varnes classification of landslide types». *Landslides*, 11, 167-194.

Hürlimann, Marcel; Copons, Ramon y Altimir, Jordi (2006). «Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach». *Geomorphology*, 78 (3-4), 359-372. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.02.003>

IPCC – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

Iverson, Richard M. (2014). «Debris flows: Behaviour and hazard assessment». *Geology Today*, 30(1), 15-20. <https://doi.org/10.1111/gto.12037>

Jakob, Matthias (2005). «A size classification for debris flows». *Engineering Geology*, 79(3-4), 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.01.006>

— (2021). «Debris-flow hazard assessments: A practitioner's view». *Environmental & Engineering Geoscience*, 27(2), 153-166. <https://doi.org/10.2113/EEG-D-20-00110>

Jakob, Matthias y Hungr, Oldrich (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlín: Springer. <https://doi.org/10.1007/b138657>

Jakob, Matthias; Stein, Dieter y Ulmi, Marc (2012). «Vulnerability of buildings to debris flow impact». *Natural Hazards*, 60, 241-261. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0007-2>

Lapietra, Isabella; Rizzo, Annalisa; Colacicco, Raffaele; Dellino, Pierfrancesco y Capolongo, Donatella (2023). «Evaluation of Social Vulnerability to Flood Hazard in Basilicata Region (Southern Italy)». *Water*, 15, 1175. <https://doi.org/10.3390/w15061175>

Li, Xiaolong; Chen, Jun; Chen, Xiaohong; Zhao, Wen; Chen, Hao y Zhang, Shuo (2024). «A model for the mean velocity of debris flow movement based on the minimum energy dissipation principle». *Journal of Mountain Science*, 21(12), 3961-3970. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8612-1>

Li, Zuoli; Nadim, Farrokh; Huang, Haiying; Uzielli, Marco y Lacasse, Suzanne (2010). «Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards». *Landslides*, 7(2), 125-134. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3>

Li, Yanan; Shen, Jie; Huang, Ming y Peng, Zhen (2023). «Debris Flow Classification and risk assessment based on combination weighting method and cluster analysis: A case study of debris flow clusters in Longmenshan Town, Pengzhou, China». *Applied Sciences*, 13(13), 7551. <https://doi.org/10.3390/app13137551>

Lizarralde, Gonzalo; Johnson, Cassidy y Davidson, Colin (2014). *Rebuilding after disasters: From emergency to sustainability*. Londres: Routledge.

McCullagh, Declan; Cámaro-García, William; Dunne, Daniel; Nowbakht, Pouria; Cumiskey, Liam; Gannon, Colin y Phillips, Conor (2025). «Development of a social vulnerability index: Enhancing approaches to support climate justice». *MethodsX*, 14, 103290. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103290>

Mendel, Jerry M. (2024). *Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems: Introduction and New Directions* (3.ª ed.). Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-35378-9>

Mendoza, Álvaro; Solano, Carolina; Palencia, Diana y García, Diego (2019). «Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment». *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 348-360. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>

Montoya, Liliana; Silva, Sandra y González, Juan E. (2009). «Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas: Caso de aplicación a la quebrada Doña María». *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 11-29.

Moreno-Murillo, Julián; Duque, Ricardo y Ordoñez, Jorge (2019). «The recurrent debris flows in Mocoa-Colombia». En: *E-Proceedings of the 38th IAHR World Congress*. IAHR.

Moretto, Belén; Gentili, Juan O. y Campo, Ana M. (2024). «El relieve como un factor de la peligrosidad de inundación en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina)». *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*, 111, 33-56. <https://doi.org/10.7203/CGUV.111.26542>

Pierson, Thomas C. y Costa, John E. (1987). «A rheologic classification of subaerial sediment-water flows». *Reviews in Engineering Geology*, 7, 1-12. <https://doi.org/10.1130/REG7-P1>

Pizarro, Roberto (2001). *La vulnerabilidad social y sus desafíos: Una mirada desde América Latina*. Santiago de Chile: CEPAL. Serie Estudios Estadísticos y Prospectivos, 6.

Ramos, Ana María; Reyes, Andrés Augusto; Munévar, María Alejandra; Ruiz, Gloria Lucía; Machuca, Sandra Viviana; Rangel, Martha Sofía et al. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Pontificia Universidad Javeriana. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>

Rangel Flórez, Martha Sofía; Medina Orjuela, María; Machuca Castellanos, Sandra Viviana y Ruiz, Gloria (2021). *Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en Guacamayas – Boyacá a escala 1:2.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Ribas Palom, Anna y Saurí Pujol, David (2022). «Las soluciones basadas en la naturaleza como estrategias en la gestión del riesgo de inundación». *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*, 108-109, 819-832. <https://doi.org/10.7203/CGUV.108-9.23829>

Ross, Timothy J. (2016). *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (4.ª ed.). Londres: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119994374>

Saaty, Thomas L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Nueva York: McGraw-Hill.

Santi, Paul M.; Hewitt, Kenneth; VanDine, David F. y Barillas Cruz, Eduardo (2011). «Debris-flow impact, vulnerability, and response». *Natural Hazards*, 56(2), 371-402. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9576-8>

Seddon, Nathalie; Turner, Bill; Berry, Pam; Chausson, Alexandre y Girardin, Cécile (2020). «Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges». *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190120. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>

Takahashi, Takahisa (2014). *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures* (2.ª ed.). Londres: Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9780203946282>

Tuccillo, John V. y Spielman, Seth E. (2022). «A method for measuring coupled individual and social vulnerability to environmental hazards». *Annals of the American Association of Geographers*, 112(6), 1702-1725.

Tudose, Nicolae C.; Ungurean, Cristian; Davidescu, Ștefan; Clinciu, Ioan; Marin, Mihaela; Nita, Mihai D.; Adorjani, Adam y Davidescu, Adrian (2020). «Torrential flood risk assessment and environmentally friendly solutions for small catchments located in the Romania Natura 2000 sites Ciucas, Postavaru and Piatra Mare». *Science of the Total Environment*, 698, 134271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134271>

UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2019). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Ginebra: Naciones Unidas.

— (2022). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022: Our World at Risk: Transforming Governance for a Resilient Future*. Ginebra: Naciones Unidas.

UNGRD – Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (2020). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres: Seguimiento y evaluación de capacidades municipales*. Bogotá: Gobierno de Colombia.

Varnes, David J. (1984). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. París: UNESCO Press.

Villagrán de León, Juan Carlos (2006). *Vulnerability: A Conceptual and Methodological Review*. Bonn: UNU-EHS (Studies of the University: Research, Counsel, Education – Publication Series, n.º 4).

Zegers, Guillermo; Mendoza, Pablo A.; Garces, Alejandro y Montserrat, Santiago (2020). «Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 1919-1930. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1919-2020>

Zevenbergen, Chris; Rijke, Jeroen; Van Herk, Sebastiaan y Bloemen, Pieter (2020). «Adapting to climate change: Using adaptation pathways and adaptive planning». En: Zevenbergen, Chris et al. (eds.). *Urban Flood Resilience*. Cham: Springer.

Zhang, Xiang; Li, Hong; Fan, Yan; Zhang, Long; Peng, Shi; Huang, Jie; Zhang, Jun y Meng, Zhao (2025). «Predicting the Dynamic of Debris Flow Based on Viscoplastic Theory and Support Vector Regression». *Water*, 17, 120. <https://doi.org/10.3390/w17010120>

Zimmermann, Hans-Jürgen (2001). *Fuzzy Set Theory – and Its Applications*. Berlín: Springer.