Investigaciones Geográficas
Instituto Interuniversitario de Geografía
Universidad de Alicante
ISSN: 0213-4691 | eISSN: 1989-9890
https://www.investigacionesgeograficas.com

Incorporación de factores socioeconómicos al análisis de vulnerabilidad del riesgo por inundación en vías usando un modelo geoespacial

Incorporating socio-economic factors into roadway flood risk vulnerability analysis using geo spatial model

AUTORÍA

Alejandro Parra Saad
Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá. Colombia.

Mayerling Sanabria Buitrago
Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá. Colombia.

Ricardo Sanabria
Grupo de Energía de Bogotá. Colombia.

Karol Natalia Piñeros Dueñas
Universidad de La Salle, Bogotá. Colombia.

DOI
https://doi.org/10.14198/INGEO.25788

CITACIÓN
Parra Saad. A., Sanabria Buitrago, M., Sanabria, R., & Piñeros Dueñas, K. N. (2024). Incorporación de factores socioeconómicos al análisis de vulnerabilidad del riesgo por inundación en vías usando un modelo geoespacial. *Investigaciones Geográficas*, (81), 201-223. https://doi.org/10.14198/INGEO.25788

CORRESPONDENCIA
Alejandro Parra Saad (alparra@unisalle.edu.co)

HISTORIA
Recibido: 12 septiembre 2023
Aceptado: 29 diciembre 2023
Publicado: 26 enero 2024

TÉRMINOS
© Alejandro Parra Saad, Mayerling Sanabria Buitrago, Ricardo Sanabria y Karol Natalia Piñeros Dueñas

Este trabajo se publica bajo una licencia Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Resumen

Colombia por sus características geofísicas y ubicación en la zona tropical es propensa a fenómenos de inundación, que sumados a la vulnerabilidad de la red vial y la presencia permanente de población contiguamente a la vía, acrecientan la fragilidad social y económica en los corredores viales. Esta situación se evidencia cuando se presentan colapsos de transitabilidad por inundación, pues el país moviliza la mayoría de sus mercancías por tierra. El conocimiento y sistematización de las condiciones, sociales y económicas en el trazado vial nacional, y la incorporación de estos datos a un modelo espacial replicable, podría ser una alternativa para tomar decisiones orientadas a prevenir el riesgo. En este artículo se presenta el diseño conceptual y metodológico de una propuesta para involucrar los factores socio económicos requeridos en una evaluación del riesgo por inundación en vías utilizando herramientas de análisis espacial en el tramo piloto Ruta 6008 Chiquinquirá-Sáchica (36 km). Se cuantifica un índice global de aspectos socioeconómicos que se relaciona con la vulnerabilidad en tres niveles: local, zonal y regional. Como resultado principal se encuentra que el corredor vial presenta un nivel de vulnerabilidad media-alta, debido a los aspectos de exposición y fragilidad en las condiciones de vivienda y medios de vida.

Palabras clave: vulnerabilidad socioeconómica; inundación; corredor vial; cartografía; análisis geoespacial; sistema de información geográfica.

Abstract

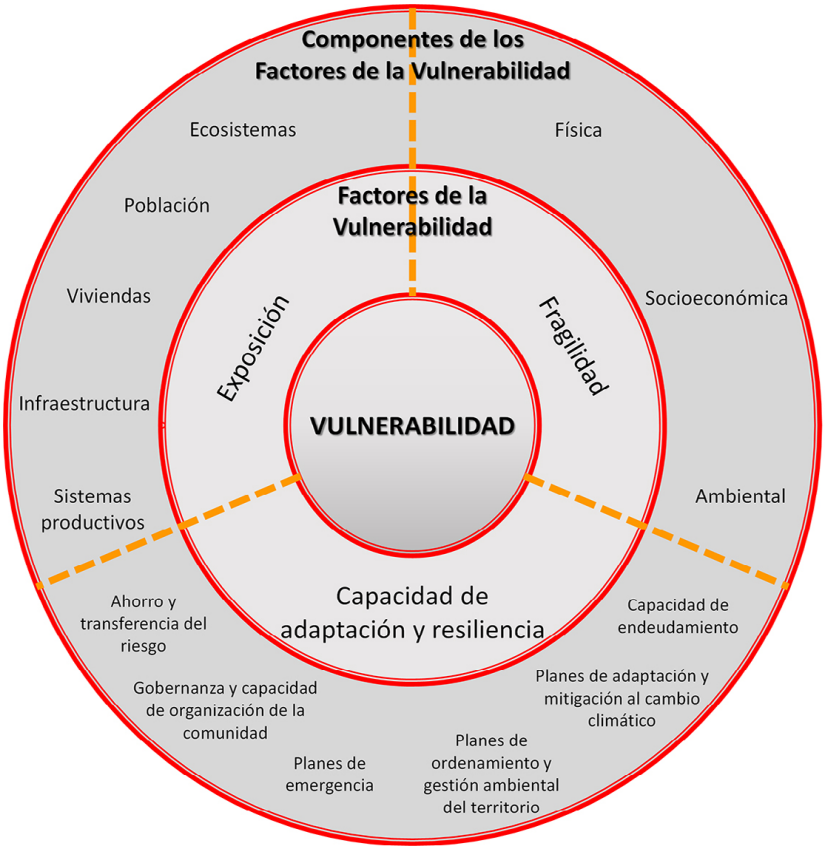
Due to its geophysical characteristics and location in a tropical zone, Colombia is prone to flooding phenomena, which, in addition to the vulnerability of the road network and the permanent presence of the population residing close to the roads, increase the social and economic fragility of the road corridors. This situation is evident when traffic collapses due to flooding, as the country mobilizes most of its goods by land. The knowledge and systematization of the social and economic conditions of the national road layout, and the incorporation of these data into a replicable spatial model, could be an alternative for making decisions aimed at risk prevention. This paper presents the conceptual and methodological design of a proposal of the socioeconomic factors required in a road flood risk assessment using spatial analysis tools in the pilot section Route 6008 Chiquinquirá-Sáchica (36 km). A global

la vulnerabilidad social, se enmarca en el grado de afectación que puede experimentar una comunidad en sus condiciones y medios de vida asociados con el espacio físico llamado vía, asimismo, este espacio físico provee o produce certezas sociales como la comunicación continua, la movilidad de materias primas y alimentos, etc., que dan la sensación de seguridad, por lo que cualquier cambio o interrupción desprovee e inhabilita a la comunidad o usuarios de una vía.

Otro aspecto conceptualmente importante y relacionado con lo anterior, es la incapacidad para enfrentar la exposición a un determinado riesgo y una inhabilidad para adaptarse activamente ante tal situación, en este punto la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) define la vulnerabilidad social como la sumatoria de tres aspectos: exposición a riesgos, incapacidad para enfrentarlos e inhabilidad (CEPAL, 2002). En síntesis, la vulnerabilidad social es producto de los procesos sociales que generan una exposición desigual a los riesgos y situaciones de crisis y estrés, donde determinados individuos y grupos son más propensos a los riesgos y a las desigualdades, las cuales se pueden reproducir (Sánchez-Gonzalez & Egea-Jiménez, 2011).

De otra parte, Vera y Albarracín (2015) aportan componentes adicionales en el marco de la vulnerabilidad al referir que … "La vulnerabilidad es función de tres componentes principales: la exposición ante amenazas naturales, socio-naturales o antrópicas; la sensibilidad o fragilidad de los elementos expuestos y la capacidad de adaptación o recuperación" (p. 111), la siguiente figura expone los tres componentes y factores de la vulnerabilidad.

Figura 1. Factores y componentes de la vulnerabilidad



Fuente: Vera & Albarracín 2015, p. 112. Elaboración propia

Por otra parte, el concepto de vulnerabilidad económica ha sido menos tratado en la literatura, aunque existen varias definiciones e interpretaciones (Saldaña-Zorrilla, 2006). Normalmente se ha asociado la vulnerabilidad económica a los aspectos macroeconómicos, sin embargo, existen visiones que reducen el espectro a análisis de la vulnerabilidad económica a los posibles grados de daños a los que se enfrenta una persona o comunidad. Adicionalmente, existen interpretaciones muy sesgadas hacia los impulsores o determinantes de la vulnerabilidad económica en el contexto del desarrollo internacional, cuyo rasgo central es considerar la vulnerabilidad económica como una situación en la que los países menos adelantados se encuentran en una relación de dominio y dependencia frente a los países desarrollados, es decir, en condiciones de asimetría económica.

En línea con lo anterior la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD) define la vulnerabilidad económica como una posición estructuralmente más expuesta de unos países menos avanzado con relación a otros con alto nivel de desarrollo, otros aspectos de nivel macro en el que se asocia la vulnerabilidad económica es el de las inconsistencias en el desempeño de las políticas macroeconómicas (Saldaña, 2006), no obstante, estos enfoques no sólo no abordan todos los aspectos estructurales sino que además desconocen los aspectos micro (a nivel de individuos y comunidades). Esta visión macro ha sido corregida desde otros referentes teóricos como el de la "Gestión del Riesgo" en el que se conceptúa la vulnerabilidad económica de otra forma:

> vulnerabilidad económica asociada a la relación indirecta entre los ingresos en los niveles nacional, regional, local o poblacional y el impacto de los fenómenos físicos extremos, es decir que se asocia con la pobreza y a la incapacidad de generar más recursos económicos o medios de sustento por la situación social particular o la baja capacidad de restablecer los mecanismos para generar ingresos ante la ocurrencia de una amenaza natural; vulnerabilidad de los sectores más deprimidos, desempleo, insuficiencia de ingresos, inestabilidad laboral y dificultad de acceso a los servicios de educación, salud, ocio, entre otros (Wilches, 1989).

Este acercamiento a la vulnerabilidad social y económica permite evidenciar la complejidad y diversas dimensiones de la vulnerabilidad, por lo que su abordaje metodológico se realiza a partir de la definición de categorías que delimitan condiciones o aspectos a analizar, este matiz permite puntualizar en la interacción entre los aspectos sociales y económicos de las personas (y comunidades) con los corredores viales, a partir de la compilación de información que conduce a caracterizar las condiciones y calidad de vida de los habitantes en un territorio, así como las formas de organización productiva y los medios de sustento. Conceptualmente en este trabajo se delimita los "aspectos sociales" como el conjunto de características que reflejan la forma de organización de las comunidades, mientras que el "aspecto económico" se entiende como las características que reflejan las formas de organización de la producción y/o los medios de generación de ingresos en una comunidad o zona. Además, con el levantamiento de información de estos aspectos se logra realizar mediciones y relaciones entre variables que permite la construcción de indicadores, los cuales permiten describir las características y comportamientos de interés (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2007) y permiten identificar debilidades relativas o condiciones de deterioro que agravarían los efectos directos causados por fenómenos peligrosos (Cannon, 2003).

En cuanto a la utilización de variables sociales y económicas para medir la vulnerabilidad se encuentran referencias recientes que emplean un set de variables amplio para validar modelos de vulnerabilidad social que sirven de base para validar modelos de vulnerabilidad social en corredores viales, Rufat y otros profundizan en este punto realizando un estudio acerca de qué tan validos son los modelos de vulnerabilidad social (Rufat et al., 2019). Los autores analizan varios modelos, los constructos empleados para para la representación de la categoría "Social" y las variables utilizadas para captar la información, entre las categorías identificadas se encuentran criterios asociados a las personas como la edad , el género, la raza, el ingreso, nivel educativo, dominio de otro idioma, estado civil, condición de desempleo y pobreza entre otros, además se encuentran criterios asociados a las condiciones de habitabilidad e infraestructura de las viviendas como tipo de vivienda, tipo de propiedad de la vivienda, porcentaje de población que vive en alojamientos grupales, vivienda en estructuras multiunidades entre otras, variables muy similares a las utilizadas en la propuesta metodológica que se presenta en este trabajo y que fueron objeto de validación empírica y de constructo como lo sugieren Rufat et al. (2019).

De otro lado, Tascón-González et al. (2020), proponen una metodología para calcular y analizar la vulnerabilidad social frente a las inundaciones, apoyándose metodológicamente en la integración y ponderación de indicadores de exposición y resiliencia, además, la selección de indicadores se basa en el método del proceso analítico jerárquico (AHP). Los autores construyen un índice de vulnerabilidad a partir de la agregación de categorías de vulnerabilidad por exposición y por resiliencia incluyendo variables sociales como edad género, forasteros, turistas, densidad poblacional, nivel de educación, acceso a formas de telecomunicación entre otras, además de variables como equipamientos de comunicación, accesibilidad a vías, población de voluntariado. Estas variables son cuantificadas, posteriormente normalizadas y utilizadas para la estimación de un índice de vulnerabilidad social por inundación en Ponferrada, España.

Otros autores que también se apoyan metodológicamente en la identificación de aspectos sociales para la construcción de un índice de vulnerabilidad social por inundaciones son Koks et tal. (2019) y Tate et al. (2021). Los primeros realizan un análisis de riesgos en la infraestructura vial y ferroviaria, a partir del análisis

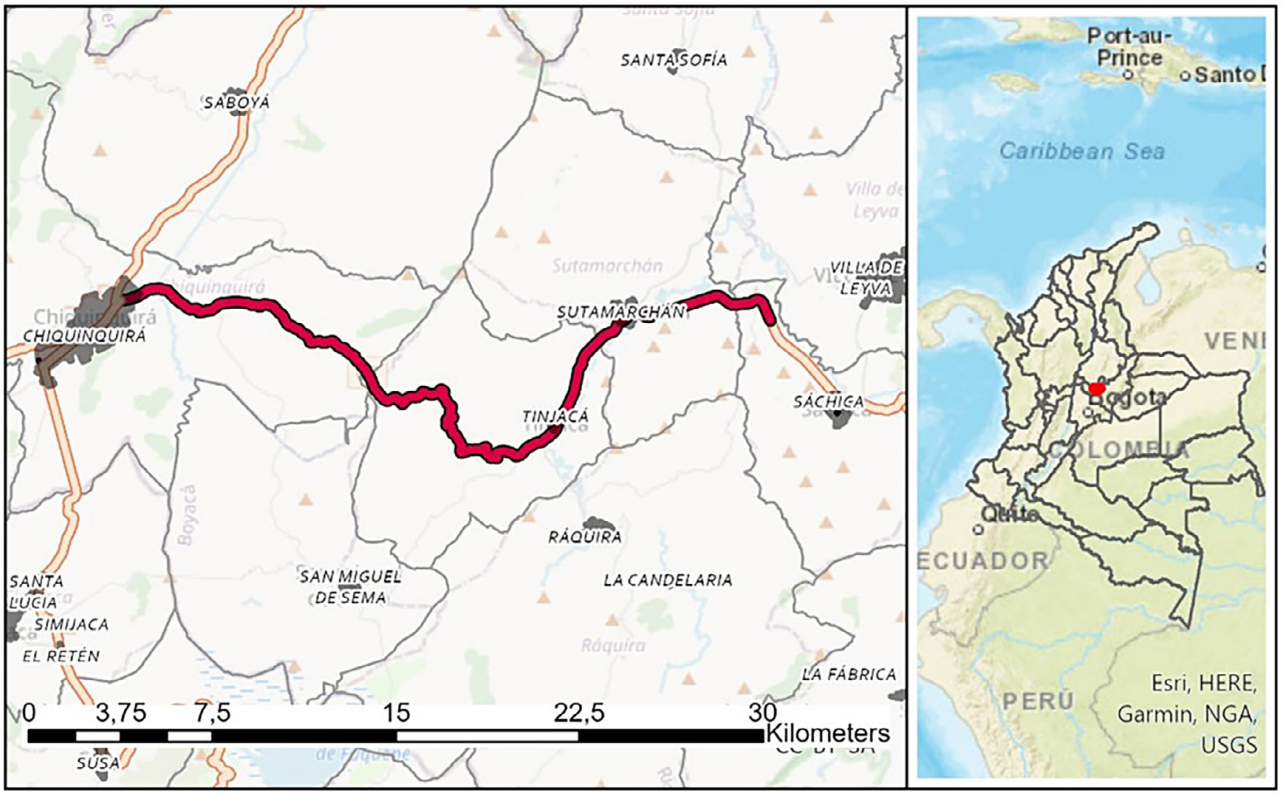
de la exposición global a peligros naturales, realizando el estudio a escala mundial, desagregando los países según el nivel de ingreso, mientras que los segundos realizan un estudio sobre la vulnerabilidad social y la exposición a inundaciones en Estados Unidos. Los estudios tienen en común la construcción de un índice de exposición por inundación y la utilización de herramientas de georreferenciación para establecer las zonas con mayor vulnerabilidad. este procedimiento es similar al utilizado al utilizado tanto en el procedimiento metodológico como en las categorías conceptuales a la adecuación de variables e indicadores, como la utilización de categorías como población migrante (Rufat et al., 2015); Tascón-González et al., 2020), características socioeconómicas (Koks et tal., 2019; Tate et al., 2021) y condiciones de la infraestructura de vivienda (Rufat et al., 2019), validando los métodos, categorías y variables empeadoas en esta propuesta metodológica, la cual se describe en el siguiente apartado.

2. Metodología

2.1. Definición del área de estudio

Teniendo en cuenta los estudios de riesgo identificados por el Instituto Nacional de Vías de Colombia se definieron áreas de interés por regiones para implementar la metodología de inclusión de indicadores sociales y económicos en la cuantificación de la vulnerabilidad del riesgo por inundación. Es así que se establece como estudio de caso la Dirección Territorial (DT) Boyacá: Ruta 6008 Transversal Puerto Boyacá-Monterrey-Sáchica (36 km).

Figura 2. Corredores viales del área de estudio – Ruta 6008 transversal Puerto Boyacá-Monterrey-Sáchica



Elaboración propia

El tramo de la ruta 6008, parte del casco urbano de Chiquinquirá, hasta el municipio de Sáchica, atravesando los municipios de Tinjacá y Sutamarchán, dentro del departamento de Boyacá. Es una zona con topografía suave y con pendientes promedio de 3,7 %, salvo un tramo de 8 km en la zona intermedia del transecto donde las pendientes alcanzan valores de hasta del 11%. En general, es una zona relativamente estable desde el punto de vista tectónico, pues no se evidencian fallas geológicas a lo largo del corredor solamente un plegamiento Anticlinal de Tinjacá-Oiba, lo que indica que las rocas aflorantes expuestas en el núcleo son rocas antiguas con buenos niveles de litificación. En la zona de Chiquinquirá se encuentran depósitos aluviales al norte y shales y calizas al sur que se extienden hasta Sáchica, donde además se pueden encontrar depósitos aluviales.

La alta densidad de quebradas y ríos del sector hacen que a lo largo del tramo de estudio se presenten zonas de intersección con los cauces, lo que establece escenarios de posible amenaza por avenidas torrenciales, socavación e inundación (especialmente en periodos hidrológicamente húmedos como cuando se presenta el fenómeno de *La Niña* en el país). Esta información fue confirmada consultando las bases de datos de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD que clasifica este sector como una zona de amenaza media-alta por inundación.

2.2. Levantamiento de la información

Para el análisis de la vulnerabilidad socioeconómica sobre los corredores viales se requiere información detallada de la red vial. Por tanto, se diseñó un formulario en la aplicación Survey 123 de la plataforma ArcGIS online de ESRI ® que recopila y georreferencia las variables socioeconómicas requeridas en el análisis de la vulnerabilidad del riesgo por inundación en vías propuesto en este artículo (Figura 2).

Al terminar de diligenciar el formulario, la aplicación Survey 123 genera la geolocalización del dato, permitiendo crear una capa de información tipo punto que reúne las preguntas del formulario en variables espacializadas para el componente social y económico, de manera que se logra una verificación y registro de datos en campo a escala detallada, con el fin de optimizar los geo-procesos para la valoración de la vulnerabilidad.

Figura 3. Formulario en línea diseñado por el grupo de trabajo

Elaboración propia

Cada tramo de vía presenta condiciones particulares, por tanto, el propósito de este instrumento de captura es compilar el conocimiento de los administradores viales en sus respectivos recorridos, y obtener a través de un formulario en línea y en tiempo real, la observación directa de las características tanto de las condiciones económicas como sociales. A través de un punto georreferenciado, se almacenan los descriptores que han sido analizados, revisados y evaluados por un grupo de trabajo multidisciplinario en el tema del análisis de riesgo por inundación, este archivo de puntos permite ser integrado directamente a una composición de mapa y compararlo con las demás capas de información evitando pasos intermedios para la visualización de los trabajos en campo.

2.3. Definición de criterios socioeconómicos para el modelo

Para seleccionar y priorizar los aspectos socioeconómicos que componen la vulnerabilidad, se realizó una búsqueda y clasificación de información teniendo en cuenta la revisión del estado del arte de indicadores de medición de la vulnerabilidad socioeconómica y se realizó un taller (panel de expertos) conformado por

administradores viales de distintas direcciones territoriales y funcionarios del Instituto Nacional de Vías de Colombia; se presentaron varios escenarios de las condiciones socioeconómicas de distintos tramos viales para que obtuvieran una comprensión suficiente de las condiciones socioeconómicas en el área de estudio, además se discutió ampliamente con los participantes sobre la relación entre los eventos de amenaza natural como las inundaciones y la afectación sobre la funcionalidad y nivel de prestación de servicio de las vías, así como las repercusiones sobre el territorio y las comunidades. Esto se realizó con el fin de realizar un ejercicio de co-creación de identificación de factores socioeconómicos que puedan ser vinculados en la medición de la vulnerabilidad socioeconómica en la red vial, y posteriormente se utilizó el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) mostrando a los expertos varias comparaciones por pares de los factores socioeconómicos propuestos, para ser ponderados bajo una escala numérica con valores entre 1 y 9, como lo sugiere Saaty (1980, 1990).

Posteriormente se desarrolló el método AHP realizando la matriz de comparación y de Normalización, es decir que se identificó la fuerza e intensidad de cada factor socioeconómico para cada experto y se calculó la importancia relativa entre factores, además se estableció el vector propio y el valor Landa λ_{MAX}, y finalmente se estableció la confiabilidad del modelo AHP mediante el índice de consistencia, $IC = (\lambda_{MAX} - n/n - 1)$, y la razón de consistencia $(CR = CI/RI)$ donde RI es índice de consistencia aleatoria. De esta forma de definieron y priorizaron los factores socioeconómicos que hacen parte de la propuesta metodológica de este trabajo, además, se realizó una clasificación de criterios y subcriterios incluyendo las definiciones y justificación de su selección, como se muestra en las tablas 1 y 2. En síntesis, la selección de factores incluidos en la propuesta metodológica responde a la inclusión de aspectos socioeconómicos que se ven vulnerados ante una amenaza en los corredores viales, por lo que presenta una visión más amplia que la que se reconoce tradicionalmente para la vulnerabilidad por accesibilidad y/o conectividad a la red vial y a la interrupción en los servicios de la vía en un tramo (Perles et al., 2019). Por tanto, los factores incluidos no se limitan a captar información puntual sobre la funcionalidad de la vía, sino que, además, muestran una enfoque ampliado de la vulnerabilidad socioeconómica en los corredores viales.

La tabla 1, presenta la descripción de las categorías incluidas en el componentes social: 1) ubicación de la vivienda, 2) densidad de viviendas, 3)Tipo y estado de estructuras de recolección de aguas lluvias, aguas residuales y/o agua potable en la vivienda, 4) ubicación en la franja de retiro —que corresponde al espacio de terreno reservado para las carreteras, es decir, que es el espacio público a cada lado de la vía exclusivo para ella y en el cual está prohibido hacer construcciones y realizar actividades comerciales—, 5) necesidades básicas insatisfechas, 6) condiciones de susceptibilidad y 7) medios de vida insuficientes, mientras que la tabla 2, presenta la descripción de las categorías incluidas en los aspectos económicos: 1) actividad económica en la faja de retiro y 2) Tráfico Promedio Diario (TPD). Estas categorías se seleccionaron con base en la revisión de literatura y la aplicación de la metodología de evaluación multicriterio a partir del proceso de análisis jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1980, 1990); la metodología fue aplicada a un grupo piloto de 45 administradores viales y funcionarios del INVIAS, es decir, que la priorización y selección de los factores sociales y económicos para medir la vulnerabilidad, fue realizada y concertada con los profesionales que permanentemente trabajan estos temas.

A partir de los aspectos definidos se establecieron las variables, a medir para la delimitación de los aspectos sociales y económicos delimitados en el paso anterior y finalmente se construyeron los indicadores (instrumento para captar la información de cada variable). Estas variables e indicadores, captan las características relevantes de la vulnerabilidad (sistema socioeconómico) desde el punto de vista de la exposición, la fragilidad y la resiliencia; en el contexto de la vulnerabilidad social y vulnerabilidad económica tal y como se indica en la tabla 3.

La exposición se reconoce como la cercanía o ubicación de los aspectos sociales (viviendas y población) y económicos (actividades productivas y los medios de vida) a los fenómenos naturales de inundación; es decir, donde los aspectos población, infraestructura y sistemas de producción se encuentran en zonas de incidencia potencial de las amenazas contempladas. La fragilidad se interpreta como la susceptibilidad en las condiciones de la infraestructura de vivienda y la población, es decir, que hace referencia al nivel de vulnerabilidad intrínseca de los elementos (sociales y económicos) expuestos a ser afectados por las amenazas por inundación y, finalmente, la resiliencia se delimita como la capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse (adaptación y respuesta) ante el impacto de una amenaza, es decir, que se asocia con la posibilidad de que las comunidades puedan afrontar, recuperarse y adaptarse ante los cambios en sus condiciones normales de vida por la presencia de un desastre de inundación.

Tabla 1. Aspectos Sociales

Aspecto	Definición	Criterio	Definición	Subcriterio	Justificación
Social	Conjunto de características que reflejan la forma de organización de las comunidades, como tradiciones, idiosincrasia, costumbres, cultura, formas de relacionarse, entender la realidad y pensar, además incluye la composición y flujos de movimientos de la población, así como la estructura del hogar o la familia, condiciones de salud, educación, acceso a servicios públicos, características demográficas y de las viviendas y medios de vida que, en conjunto definen el grado de susceptibilidad ante eventos que afecten el desarrollo de una vida familiar y social en condiciones adecuadas.	Criterio 1: Condiciones de la vivienda.	Características que describen las condiciones de susceptibilidad de las personas que habita en una vivienda asociado a la exposición o fragilidad.	Ubicación de la vivienda.	Las viviendas ubicadas en zonas rurales suelen ser más vulnerables, debido a la ausencia o deficiencia en la cobertura de servicios públicos, de salud y atención de emergencias. La ubicación de la vivienda condiciona no sólo un aspecto de exposición sino también de fragilidad por ubicación, dificultad de acceso y tiempos prolongados de respuesta, que dejan en condición de desprotección a la comunidad (CEPAL, 2002).
				Densidad de viviendas.	La alta concentración de viviendas y habitantes permite tener una idea de la densidad poblacional en la zona y a su vez de la cantidad de personas que podrían estar expuestas ante un evento de movimiento en masa o inundación. La concentración de población espacialmente favorece la afectación en conjunto de asentamientos humanos, en particular en áreas marginadas que usualmente coinciden con las zonas de mayor riesgo por inundación y deslizamientos (Carreño et al., 2005).
				Tipo y estado de estructuras de recolección de aguas lluvias, aguas residuales y/o agua potable en la vivienda.	La falta o mal estado del sistema de recolección de aguas lluvia o residuales puede incidir en los movimientos en masa e inundaciones. El tipo y la presencia de servicios básicos comunitarios existentes, genera condiciones propicias para la atenuación o incremento de la vulnerabilidad ante amenazas naturales (Thomas et al., 2013).
				Ubicación en la franja de retiro.	Las fajas de retiro constituyen zonas de reserva para las carreteras (derecho de vía), estos espacios hacen parte del espacio público del corredor vial, por lo que no está permitido realizar construcciones o realizar actividades comerciales (Ley 1228 de 2008).
		Criterio 2: Condiciones y medios de vida.	Características que describen las condiciones de susceptibilidad en las de las personas por la presencia de población migrante y/o a la baja capacidad de generar ingresos en el hogar, que puede suponer una condición de fragilidad.	Necesidades básicas insatisfechas.	El acceso a infraestructura de calidad juega un papel crucial en la construcción de la resiliencia de un individuo y la reducción de la vulnerabilidad a los impactos de las amenazas naturales (Owusu & Nursey 2019).
				Condiciones de susceptibilidad.	El bajo nivel de asimilación o la baja capacidad de recuperación de las personas frente a la ocurrencia de un movimiento en masa o inundación los hace vulnerables, en este sentido la población migrante es susceptible de ser vulnerable debido a la falta de coberturas sociales y la inestabilidad económica a la que se enfrentan (Organización Internacional para las Migraciones (OIM), 2014).
				Medios de vida insuficientes.	Baja capacidad que tienen las personas de reestablecer sus medios de vida y sustento ante la ocurrencia de una amenaza natural (OIM, 2014).

Fuente: Carreño et al. 2005; CEPAL, 2002; Ley 1228 de 2008; OIM, 2014; Owusu & Nursey, 2019 y Thomas et al., 2013. Elaboración propia

Tabla 2. Aspectos Económicos

Aspecto	Definición	Criterio	Definición	Subcriterio	Justificación
Económico	Características que reflejan las formas de organización de la producción que describen una comunidad o zona, y la forma en que se distribuye y moviliza la producción, así como la generación de ingresos, relaciones productivas y generadores (vehículos) de valor agregado.	Criterio 1: Condiciones económicas	Características que describen las condiciones económicas en la faja de retiro y en el corredor socioeconómico	Actividad económica en la faja de retiro	Esta variable está principalmente asociada con el factor de exposición. Las actividades antrópicas instaladas en el territorio (industrial, comercial, agropecuaria, minería, etc.), determinan el tejido productivo y los niveles de desarrollo económico, por lo que cualquier alteración que influya negativamente en términos de pérdidas, daños, afectaciones económicas y sociales inciden en la vulnerabilidad (Thomas et al., 2013).
		Criterio 2: Dependencia económica	Características que describen el grado de dependencia de la población a la vía	Tráfico Promedio Diario (TPD)	Esta variable se asocia principalmente con la exposición. El tráfico promedio diario en un avía es una característica que describe la localización (Vera & Albarracín, 2015) y el grado de dependencia de la población a la vía; la intensidad en la movilidad de pasajeros y mercancías por una vía indica la dependencia de la infraestructura vial para la movilidad y conectividad, es decir, que a mayor movilidad (tráfico promedio diario), mayor flujo de interacciones económicas y sociales.

Fuente: Thomas et al., 2013 y Vera & Albarracín, 2015. Elaboración propia

Tabla 3. Clasificación de los aspectos sociales y culturales según tipo de vulnerabilidad

Criterio	Subcriterio	Indicador	Vulnerabilidad		
			Exposición	Fragilidad	Resiliencia
Condiciones de la vivienda	Ubicación de la vivienda	La(s) vivienda(s) se encuentra(n) ubicada(s) en zona urbana o zona rural.	X		
	Densidad de viviendas	La(s) vivienda(s) se encuentra(n) agrupadas o separadas.	X		
	Tipo y estado de estructuras de recolección de aguas	Se evidencia infiltración de agua (potable, lluvia o residual), por fallas o inexistencia de sistemas de recolección.		X	
	Ubicación en la franja de retiro	La(s) vivienda(s) se encuentra(n) ubicada(s) en la faja de retiro.	X		
Condiciones y medios de vida	Necesidades básicas insatisfechas	Índice de necesidades básicas insatisfechas.		X	
	Condiciones de susceptibilidad	En la zona se reconoce la presencia (permanente o transitoria) de población migrante.			X
	Medios de vida insuficientes	En la zona se identifica condiciones de empleo informal.		X	
Condiciones económicas	Actividad económica en la faja de retiro	Existe actividad económica en la faja de retiro.	X		
Dependencia económica	Tráfico Promedio Diario - TPD	Tráfico Promedio Diario = % automóviles + % buses.	X		

Elaboración propia

La caracterización de cada tramo de la red vial bajo los criterios anteriormente descritos implica varias confirmaciones las cuales podrán ser resueltas rápidamente a través de registros fotográficos, por ello, la aplicación diseñada, incluye la captura fotográfica de la información levantada para cada punto. La mayor parte de los descriptores del formulario son cualitativos (alto, medio y bajo), por lo que es conveniente conservar registros fotográficos de cualquier evento reportado desde cualquier enfoque y así confirmar el diligenciamiento del formulario. Pese a que las variables socioeconómicas establecidas para el modelo requieren de información confirmada de los tramos viales, también se consideran variables que podían ser obtenidas directamente de otras entidades del estado, estas son:

Tabla 4. Captura de información a partir de fuentes secundarias

Aspecto	Criterio requerido en el Modelo	Formulario de captura en campo	Entidad productora del dato	Unidad de análisis
Económico	condiciones económicas	Índice de necesidades básicas insatisfechas	DANE Colombia	Municipio
	condiciones económicas	Tráfico Promedio Diario - TPD	INVIAS Colombia	Tramo vial

Elaboración propia

En síntesis, para la definición de criterios socioeconómicos a ser incluidos en el cálculo de la vulnerabilidad se siguieron los siguientes pasos:

1. Búsqueda y revisión de literatura de vulnerabilidad social y económica.
2. Delimitación preliminar de aspectos, variables e indicadores para medir la vulnerabilidad socioeconómica en corredores viales.
3. Taller de socialización y co-creación de aspectos, variables e indicadores con administradores viales y expertos.
4. Panel de expertos para la asignación de pesos porcentuales (ponderación) de cada indicador (aplicación del método AHP).
5. Agregación de la información en la propuesta del índice para medir la vulnerabilidad social y económica: Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales (IASEG).

La captura de información para el índice se realizó a partir del levantamiento de información primaria a través de un formulario web, como se mencionó en el apartado 2.2.

2.4. Factores socioeconómicos en el cálculo del riesgo por inundación

Teniendo en cuenta la figura 1 y la tabla 3, se evidencian los indicadores que corresponden al componente de exposición (5 indicadores), componente de fragilidad (3 indicadores) y componente de resiliencia (1 indicador);

aunque el componente de resiliencia en Vera y Albarracín (2015), está relacionado con factores como la gobernabilidad, la capacidad de ordenación y la gestión ambiental del territorio, el nivel cultural, y la capacidad de endeudamiento entre otros, en esta propuesta metodológica se utiliza como factor de resiliencia las condiciones sociales de susceptibilidad definidas como la presencia (permanente o transitoria) de población migrante. Además, los indicadores propuestos permiten captar de forma indirecta las condiciones que generan incapacidad de sobreponerse y/o adaptarse ante la materialización de un evento amenazante y para todos los casos se capta información de los factores población (comunidades y personas), infraestructura (viviendas) y sistemas de producción (actividades productivas). Una vez identificados los criterios que serán evaluados a través del formulario, se estableció una escala de valor que permitiera cuantificar las respuestas obtenidas en el trabajo de campo. Para ello, con un grupo de trabajo multidisciplinario se definieron los siguientes rangos de calificación para cada uno de los criterios evaluados y las respectivas ponderaciones de cada una de las variables.

Tabla 5. Escala de cuantificación de los aspectos sociales y económicos

Indicador	Opciones de Respuesta	Sub-opción	Escala Numérica	Escala Categórica	Peso porcentual
La(s) vivienda(s) se encuentra(n) ubicada(s) en zona urbana o zona rural	Rural		100	Alto	12,0%
	Urbana		10	Bajo	
La(s) vivienda(s) se encuentra(n) agrupadas o separadas	Más de 6		100	Alto	12,0%
	4-6		50	Medio	
	1-3		10	Bajo	
Se evidencia infiltración de agua (potable, lluvia o residual), por fallas o inexistencia de sistemas de recolección	Si existe	Constante	100	Alto	12,0%
		Intermitente	50	Medio	
	No identificado		10	Bajo	
La(s) vivienda(s) se encuentra(n) ubicada(s) en la faja de retiro	Si		100	Alto	12,0%
	No		10	Bajo	
Índice de necesidades básicas insatisfechas	Alto	0,71-1,00	100	Alto	10,0%
	Medio	0,21-0,70	50	Medio	
	Bajo	0,0-0,20	10	Bajo	
En la zona se reconoce la presencia (permanente o transitoria) de población migrante	Si existe		100	Alto	10,0%
	No existe / No identificado		10	Bajo	
En la zona se identifica condiciones de empleo informal	Si existe		100	Alto	10,0%
	No existe / No identificado		10	Bajo	
Existe actividad económica en la faja de retiro	Si existe	3 o más	100	Alto	11,0%
		2	50	Medio	
		1	10	Bajo	
Tráfico Promedio Diario = % Automóviles + % buses	71%-100%		100	Alto	11,0%
	41%-70%		50	Medio	
	0%-40%		10	Bajo	

Elaboración propia

Es importante aclarar que la anterior ponderación es intrínseca al componente socioeconómico con el fin de definir el peso que tiene cada subcomponente, no obstante, la sola presencia de estos subcomponentes no determina la vulnerabilidad *per se*, está debe ser evaluada conforme al grado de exposición, fragilidad y resiliencia a la posible amenaza de inundaciones. Con la cuantificación de cada una de las variables y sus posibles opciones de respuesta, fue posible diseñar un modelo geoespacial para la representación cartográfica de este tipo de vulnerabilidad atendiendo tanto las variables definidas, su ponderación y las relaciones espaciales que se presentan entre ellas bajo el siguiente índice compuesto que se propone:

$$IASEG = \sum_{i=1}^{n}[(uv_i * 12\%) + (dv_i * 12\%) + (ter_i * 12\%) + (ufr_i * 12\%) + (nbi_i * 10\%) + (cs_i * 10\%) + (mvi_i * 10\%) + (aef_i * 11\%) + (tpd_i * 11\%)] \quad \text{ecuación (2)}$$

Donde IASEG es Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales, uv es la ubicación de la vivienda, dv es la densidad de viviendas, ter es el tipo y estado de estructuras de recolección de aguas lluvias, aguas residuales y/o agua potable en la vivienda, ufr es la ubicación en la franja de retiro, nbi es el índice de necesidades básicas insatisfechas, cs son las condiciones de susceptibilidad, mvi son los medios de vida insuficientes, aef es la actividad económica en la faja de retiro, tpd es el tráfico promedio diario, y el subíndice i representa cada punto observado.

A partir del planteamiento anterior se definieron los siguientes rangos y escala que puede tomar el Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales, presentados en la Tabla 6. Entendiéndose que si el valor está entre 0-40 se considera baja vulnerabilidad socioeconómica en la zona de estudio; si el valor está entre 41-70, la vulnerabilidad sería media, mientras que si el valor del IASEG está entre 71-100, se considera vulnerabilidad socioeconómica alta.

Tabla 6. Rangos y escalas de índice de aspectos socioeconómicos globales (IASEG)

Índice	Rango	Escala
Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales (IASEG)	71-100	Alto
	41-70	Medio
	0-40	Bajo

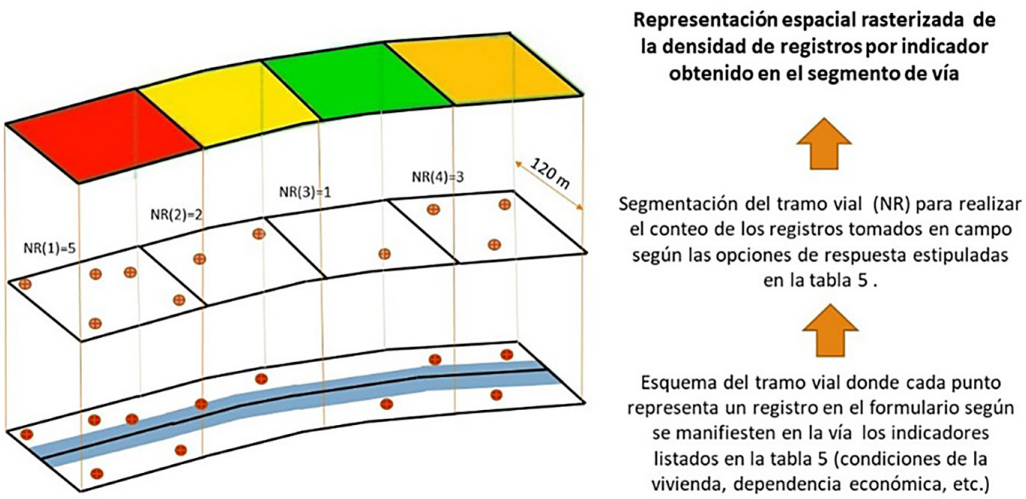
Elaboración propia

2.5 Modelo geoespacial y estructura de los datos

La ecuación (2) diseñada para integrar las variables son el fundamento del modelo espacial, pues a partir de un proceso de algebra de mapas vinculado a herramientas de sistemas de información geográfica se integran los datos respetando cada una de las valoraciones y ponderados establecidos en la formula.

Con la información capturada en el formulario de la figura 2 se genera entonces, una nube de puntos a lo largo del tramo de estudio. Cada uno de los puntos incluye los atributos de la columna *Indicadores* de la tabla 5, registrados por el operador vial en sus recorridos habituales sobre la vía. Los resultados del formulario se rasterizan mediante un análisis de proximidad y homogeneidad según el campo *Escala Categórica* de la misma tabla 5. Con este proceso se obtiene una representación continua de la condición socioeconómica que caracteriza cada tramo de estudio.

Figura 4. Representación de los puntos del formulario rasterizados



Elaboración propia

La producción de esta información cartográfica a través de una capa de puntos se manifiesta entonces como un nivel alto de detalle en la información (escala local). Estas capas fueron: i) *viviendas ubicadas en*

zona urbana o zona rural, ii) *grado de agrupación de viviendas*, iii) *infiltración*, iv) *ubicación de viviendas en la franja de retiro*, v) *población migrante en la zona*, vii) *empleo informal en la zona*, y viii) *actividad económica en la franja de retiro*, pues su resultado depende de la observación directa en campo por parte del observador.

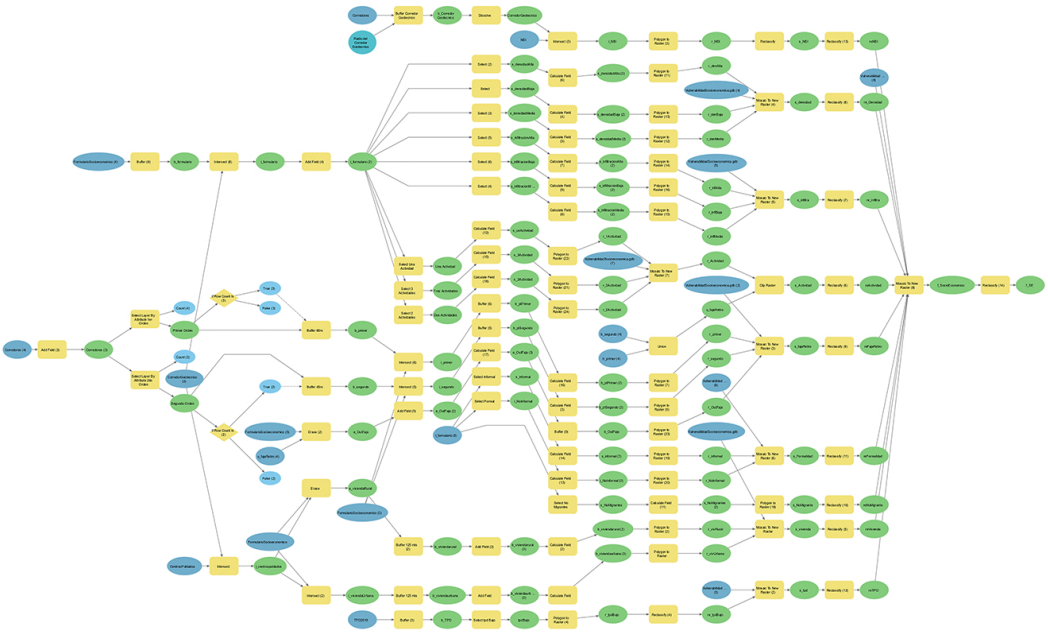
Por otro lado, la información obtenida del *índice de necesidades básicas insatisfechas* es considerado un dato a escala regional, pues es reportado a nivel municipal por el Departamento Nacional de Estadística DANE quien es la entidad encargada directamente de reportar esta cifra para el país; mientras que el indicador de *tráfico promedio diario* en el corredor vial es un dato generado por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS y se considera un dato a escala zonal, pues el reporte realizado por la entidad está establecido por cada tramo de vía.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo permite identificar no sólo la densidad de ocurrencia de los eventos en cada tramo vial, sino que también respeta la multiescalaridad que presentan sus variables.

Como lo menciona De Las Heras et al. (2020), "la posibilidad de realizar un análisis espacial a un nivel de desagregación inferior al municipio no es común" (p. 18), pues a nivel Latinoamérica, la mejora en el detalle de información georreferenciada es un proceso que avanza poco a poco; sin embargo, atendiendo la variabilidad de escalas y temáticas relacionadas; se estableció una unidad mínima de análisis adimensional que permitiera identificar la trazabilidad espacial de cada una de las capas generadas por cada indicador listado en la tabla 5 . Esto quiere decir que los geoprocesamientos no obedecen a una escala única de representación cartográfica, sino que deben ser interpretados teniendo en cuenta una unidad mínima que, para este caso, fue definida como el tamaño de pixel.

Tras tener todos los indicadores de la tabla 5 rasterizados con el mismo tamaño de pixel (9 capas de información geográfica), se diseña el modelo espacial, el cual fue desarrollado mediante el software propietario ArcGIS PRO ®. Este modelo es una estructura de procesos y geodatos que organiza la información para automatizar la integración de las variables del formulario con sus respectivas valoraciones y ponderaciones para finalmente representarlas a través de capas ráster. Con esta sistematización se facilita la ejecución del proceso en el eventual ajuste a los pesos ponderados, pues sintetiza el modelo conceptual y lo plasma en un modelo lógico que permite conocer cada paso y configuración realizada bajo la aplicación *Model Builder*, la cual crea y administra el flujo de trabajo que encadena secuencias semi-automatizadas de herramientas de geoprocesamiento.

Figura 5. Esquema de Model Builder para el análisis espacial de las variables



Nota: Dimensión y complejidad del flujo de trabajo semi-automatizado[1]

Elaboración propia

1 Para lectura y consulta detallada ingrese a: https://drive.google.com/file/d/1WGWRmfl5Hym-NdYiZPlqaO0THKVQm4g1/view

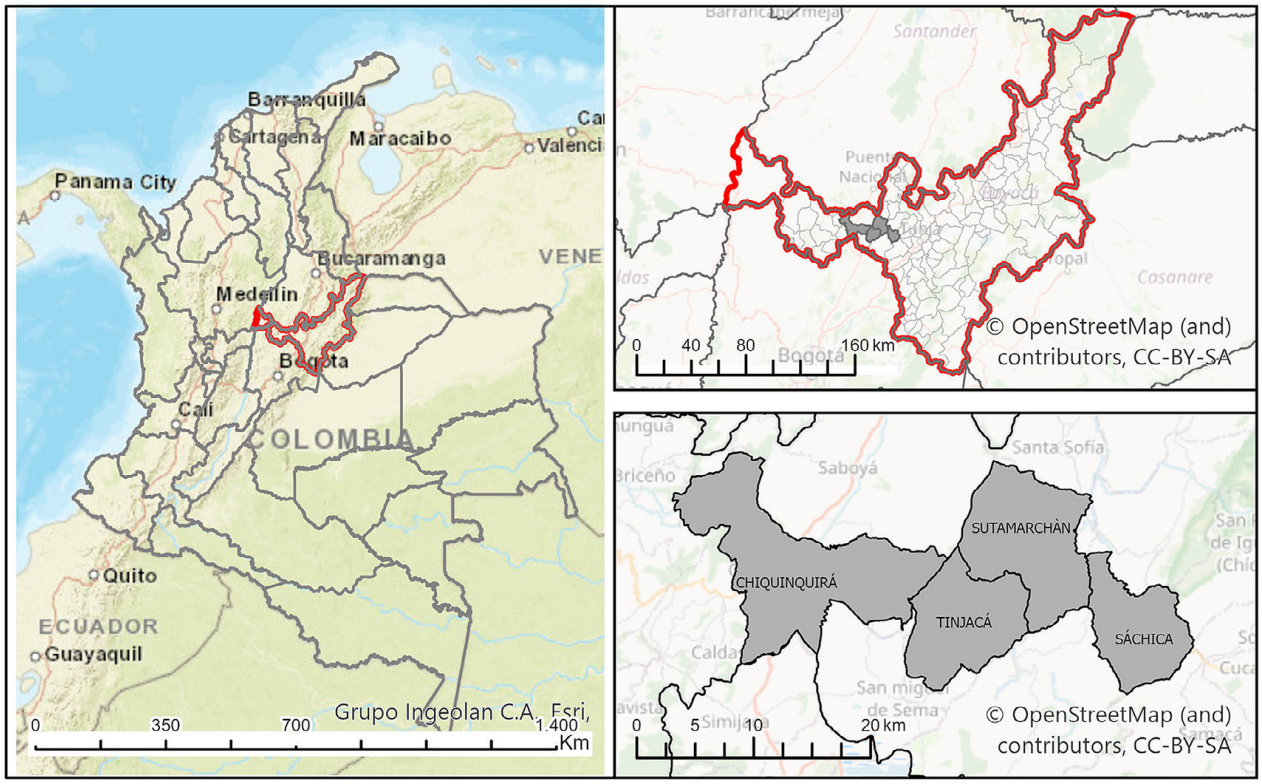
Las variables de entrada se reconocen en el modelo por ser los óvalos azules y representan las 9 capas rasterizadas del formulario que son: i) viviendas ubicadas en zona urbana o zona rural, ii) grado de agrupación de viviendas, iii) infiltración, iv) ubicación de viviendas en la franja de retiro, v) índice de necesidades básicas insatisfechas, vi) población migrante en la zona, vii) empleo informal en la zona, viii) actividad económica en la franja de retiro y ix) tráfico promedio diario en el corredor vial. Los recuadros amarillos representan los geoprocesos adelantados para la integración de las capas de información y los óvalos verdes representan los archivos geográficos de salida, producto de la integración espacial de las referidas capas.

3. Resultados

3.1. Contexto socioeconómico del área de estudio

El tramo vial "Ruta 6008" atraviesa los municipios de Chiquinquirá, Tinjacá, Sutamarchán y Sáchica, en el departamento de Boyacá, pasando por las veredas de Arrayanes, Funza, Peñas, Centro y Providencia (municipio de Tinjacá) y verdad Roa (municipio de Sutamarchán). La vocación productiva de estos municipios se basa principalmente en la agricultura, ganadería y mimería; la mayor parte de la producción agropecuaria se distribuye a través de la Ruta 6008 hacia el centro del país y la capital Bogotá, además, los cuatro municipios que atraviesa el corredor vial concentran una población cercana a 81.000 habitantes, es decir que la Ruta 6008 es un eje articulador de las condiciones sociales y económicas en el área de estudio.

Figura 6. Ubicación municipios área de estudio



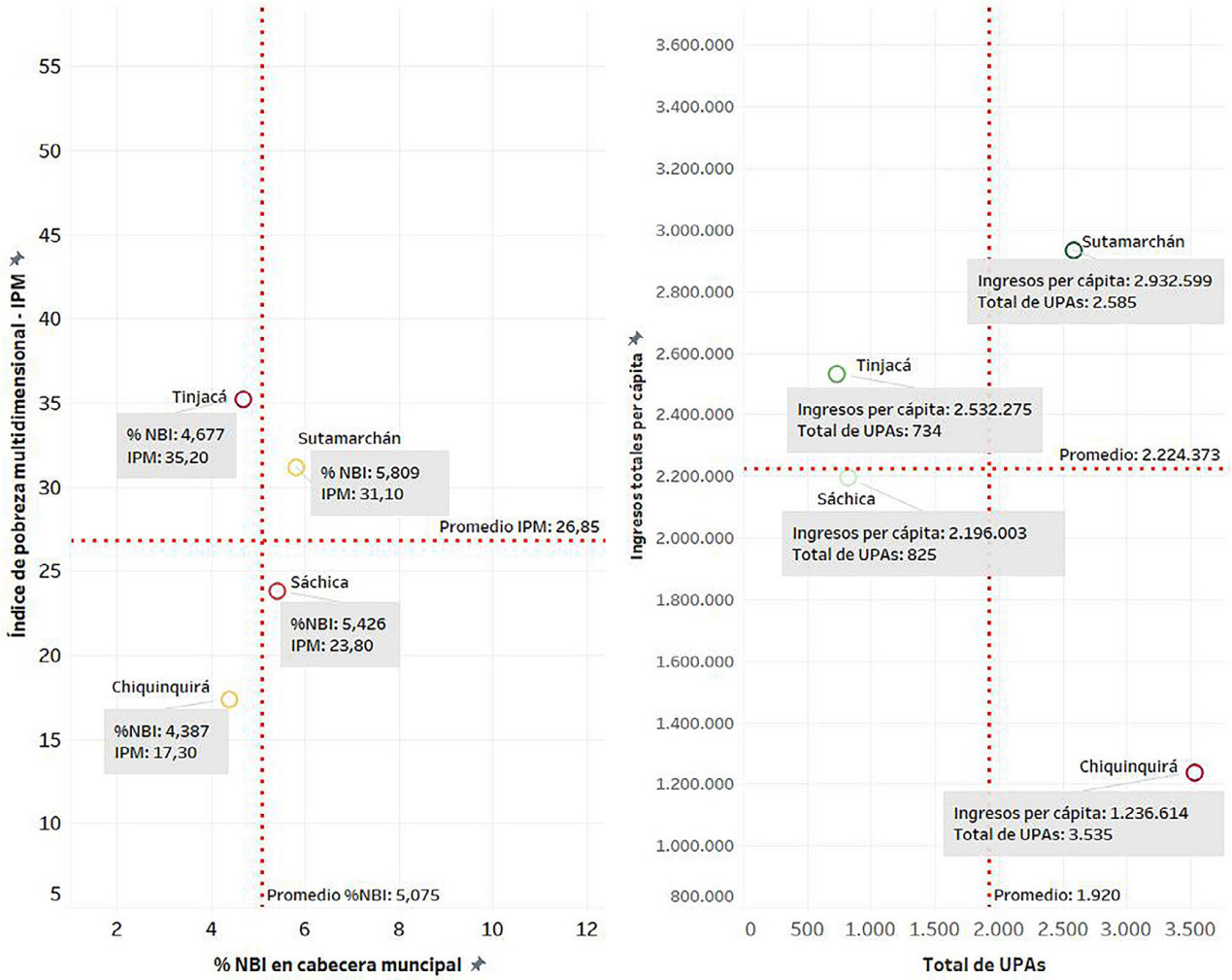
Elaboración propia

A continuación, se presenta un análisis de los cuatro municipios que hace parte del área de estudio, a partir de su comportamiento en los indicadores como el índice de pobreza multidimensional (IPM), índice de necesidades básicas insatisfechas (%NBI), de unidades productoras agrícolas (UPAs), índice de riesgo ajustado por capacidades (IRAC) y el índice de desempeño municipal (IDM), estos instrumentos al ser indicadores compuestos que incluyen varias categorías sociales y económicas, resumen bien los rasgos principales del os municipios (Botello, 2017; Feres & Mancero, 2001; Fresneda Bautista, 2007; Gutiérrez, et al., 2014)

En la parte izquierda de la figura 7 se puede observar que los municipios de Chiquinquirá y Sáchica, en términos generales, presentan buenas condiciones en aspectos socioeconómicos como el índice de pobreza multidimensional (IPM) y el índice de necesidades básicas insatisfechas (%NBI) ubicándose debajo del promedio de cada indicador (IPM: 36.85 y %NBI: 5,07). Estos niveles bajos de pobreza multidimensional y necesidades

básicas insatisfechas se corresponden con la baja especialización agrícola de los municipios (lado derecho de la figura 6), es decir que, los municipios con menos cantidad de unidades productoras agrícolas (UPAs) tienden a tener ingresos per cápita mayores, en este sentido los municipios de Sáchica, Sutamarchán y Tinjacá presentan mayores niveles de ingreso per cápita y se encuentran debajo del promedio de las UPAs, lo cual supone que la actividad agrícola en estos municipios tiene un menor peso en la economía, mientras que el municipio de Chiquinquirá se encuentra por encima del promedio de las UPAs (mayor peso de la actividad agrícola en el municipio) y registra el nivel más bajo de ingresos per cápita.

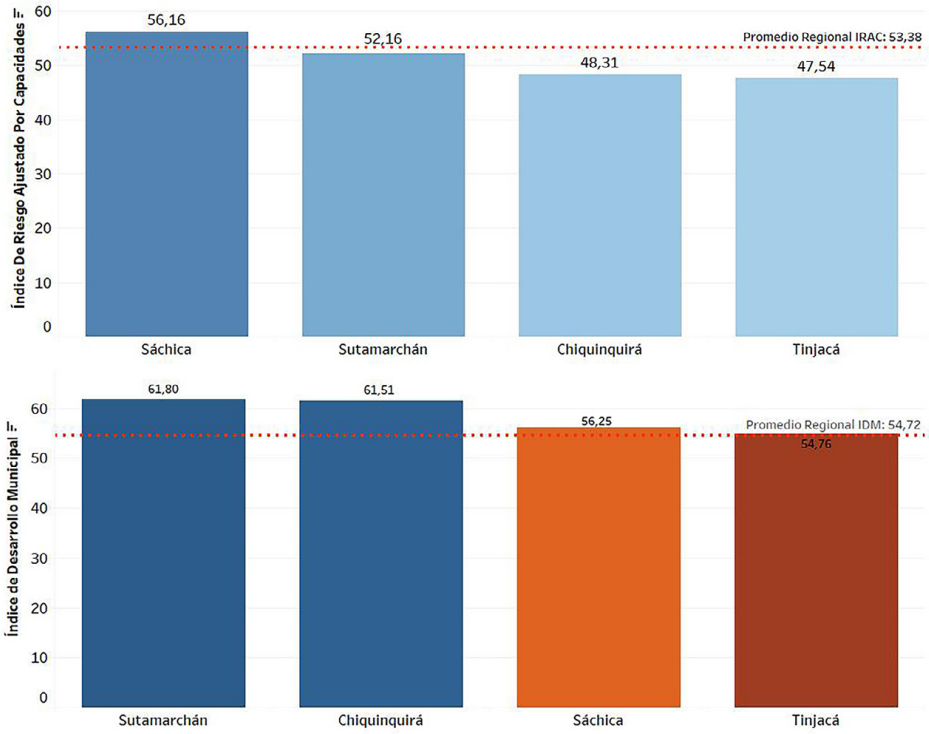
Figura 7. Índices socioeconómicos en los municipios del área de estudio



Elaboración propia

Otro rasgo distintivo de las principales características socioeconómicas en los municipios de estudio son el bajo nivel del índice de riesgo ajustado por capacidades (IRAC) y el índice de desempeño municipal (IDM). En el primer caso el IRAC mide el riesgo a nivel municipal ante eventos hidrometeorológicos y las capacidades que tienen las entidades territoriales para hacer frente a estos riesgos, mientras que el IDM sirve como una aproximación al desarrollo alcanzado por los municipios a través de las medidas de desempeño en la gestión eficiente de recursos y los resultados alcanzados. En cuanto al índice de riesgo ajustado por capacidades tres municipios se encuentran debajo del promedio regional (IRAC: 53,88%) aunque con valores cercanos al 50%, además, el municipio de Chiquinquirá se encuentra por encima del promedio (56.16%), esto indica el alto nivel de riesgo en los municipios de estudio, lo cual es consistente con los resultados evidenciados en la figura anterior, puesto que el municipio de Chiquinquirá presenta el nivel más bajo de ingresos per cápita y Tinjacá tiene el índice de pobreza multidimensional más alto, aspectos que se relacionan con la baja capacidad de respuesta ante eventos amenazantes en el corredor vial, además, una mayor proporción de pobreza y menores ingresos per cápita inciden en los factores de exposición, fragilidad y resiliencia, elevando de esta manera la vulnerabilidad en el corredor vial.

Figura 8. Índices de riesgo y desempeños en los municipios del área de estudio



Elaboración propia

Adicionalmente, la parte baja de la figura 8 evidencia que los cuatro municipios se encuentran por encima del promedio del índice de desempeño municipal (IDM: 54,72); esto llama la atención puesto que este índice evalúa 8 categorías agrupadas en 2 componentes (gestión y resultados de los municipios): movilización de recursos, ejecución de recursos, gobierno abierto y transparencia, ordenamiento territorial, educación, salud, servicios públicos y, seguridad y convivencia, es decir que estos municipios se encuentran por encima del promedio de los municipios de la región en la gestión de los recursos públicos y los resultados logrados, por lo que deberían presentar un mejor comportamiento en los indicadores de pobreza multidimensional, necesidades básicas insatisfechas y riesgo ajustado por capacidades, sin embargo, Chiquinquirá, Sáchica, Sutamarchán y Tinjacá presentan un patrón de comportamiento similar al promedio de los municipios de la región, lo que se traduce en una mayor vulnerabilidad socioeconómica en el tamo vial de la “Ruta 6008, Transversal Puerto Boyacá-Monterrey-Chiquinquirá-Sáchica, Grupo 2, PR 0 a PR 37”.

3.2. Representación geográfica de la información colectada en el formulario de captura de campo

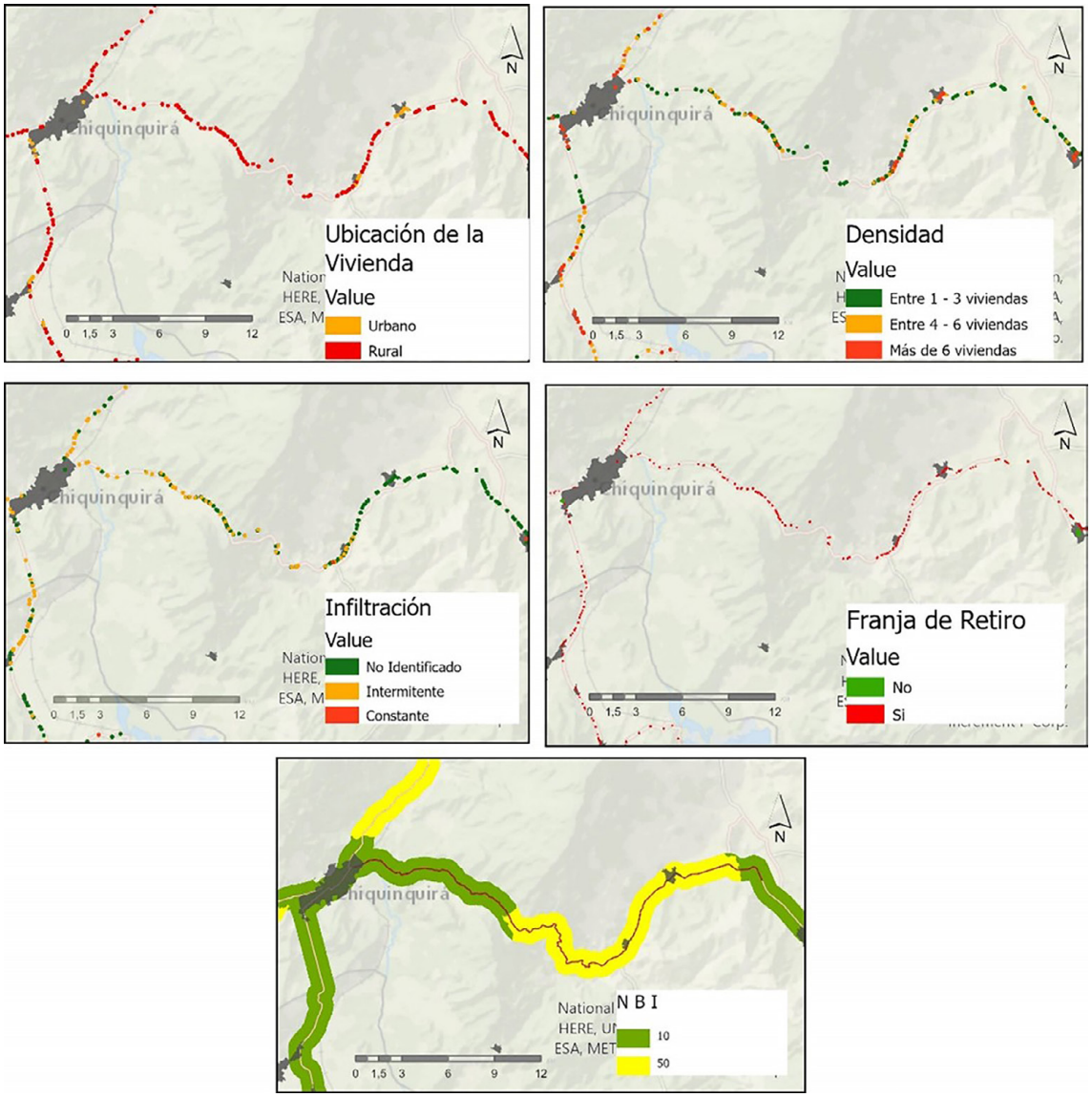
Para la representación geoespacial de los indicadores i) viviendas ubicadas en zona urbana o zona rural, ii) grado de agrupación de viviendas, iii) infiltración (agua potable, lluvia o residual), iv) ubicación de viviendas en la franja de retiro, v) índice de necesidades básicas insatisfechas, vi) población migrante en la zona, vii) empleo informal en la zona, viii) actividad económica en la franja de retiro y ix) tráfico promedio diario en el corredor vial, se realizó un proceso de geolocalización de cada punto identificado en el formulario de captura de información y se localizaron sobre los polígonos que representan para cada indicador. En el caso de la variable viviendas ubicadas en zona urbana o zona rural, se identificó si las viviendas se encuentran en centros poblados o no asignando un valor de 10 si la vivienda se encuentra en zona urbana y de 100 se encuentra en zona rural, dado que la lejanía a los centros poblados disminuye la capacidad de respuesta inmediata. En la parte superior izquierda de la figura 9 se puede observar que la mayoría de las viviendas cercanas al corredor se encuentran en zonas rurales dispersas, afectando la capacidad de respuesta inmediata de la administración municipal.

En cuanto al grado de agrupación de viviendas, este indicador identifica el grado de concentración de viviendas en la zona, es decir si existe o no asentamiento, como forma de medir la exposición, en la parte superior derecha de la figura 8 se observa que en el corredor existe un nivel bajo y medio de concentración de

viviendas, atenuando de esta manera la exposición de las viviendas. La parte central de la figura 8 presenta la información sobre la existencia de infiltración de agua potable, lluvia o residual y la ubicación de viviendas en la franja de retiro, en el primer caso, a partir de la recolección de datos por inspección visual, no se identificó infiltración en la mayor parte de corredor vial, y con relación a la ubicación en la franja de retiro se observa que la mayoría de viviendas se encuentran dentro de la franja de retiro, es decir, que están construidas a una distancia inferior a 30 metros de la vía, lo cual supone un factor de presión sobre la vulnerabilidad por exposición.

Finalmente, la parte baja de la figura 9 muestra la capa del índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI); dado que este indicador hace referencia a las condiciones de las vivienda, los ingresos y el nivel de escolaridad cuantificando criterios con construcción y materiales viviendas inadecuadas, hacinamiento crítico, acceso y calidad a servicios públicos domiciliarios, dependencia económica y niños en edad escolar que no asisten a la escuela, la cuantificación de este indicador en el corredor vial evidencia los factores asociados a las condiciones de fragilidad de las viviendas y de los medios de vida; el NBI presenta un comportamiento bajo y medio, es decir, que los centros poblados por lo que pasa el corredor vial, no presentan problemas de condiciones de vivienda inadecuadas o hacinamiento, y tampoco registran tasas alta de dependencia económica o absentismo escolar.

Figura 9. Representación geoespacial de aspectos sociales en el corredor vial

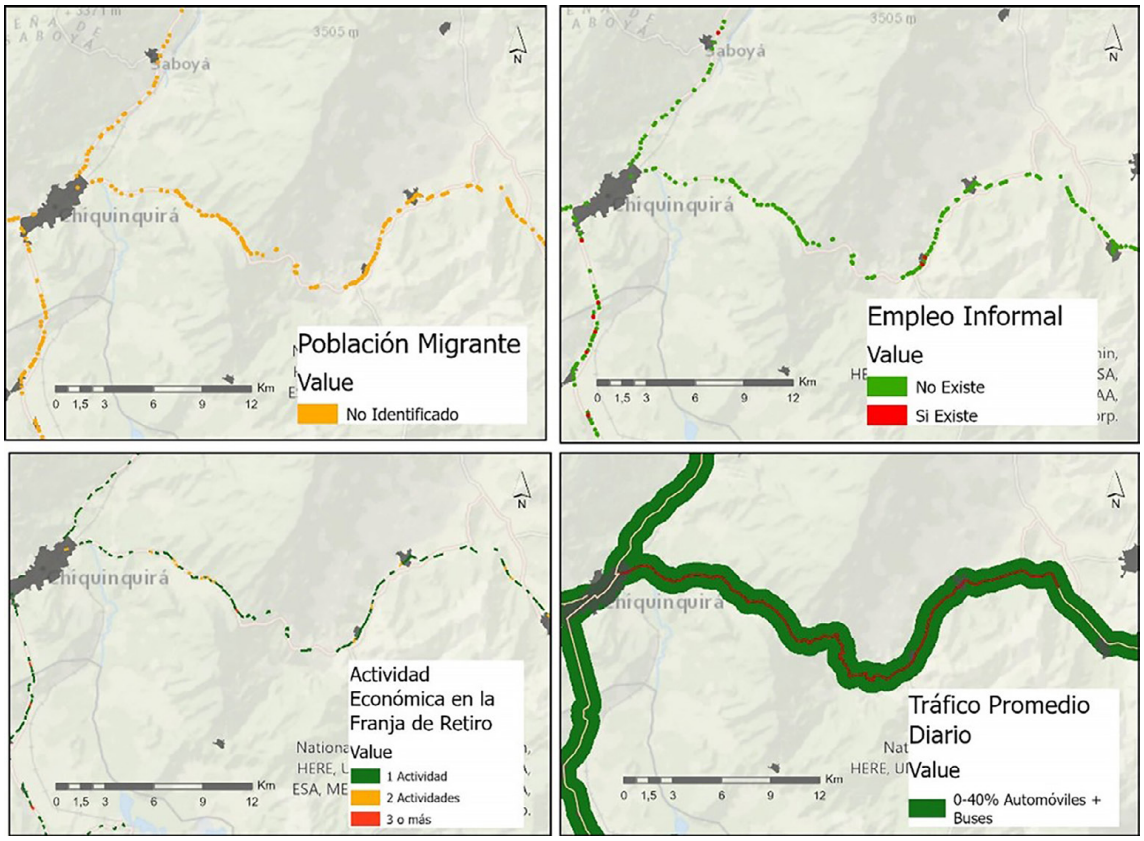


(a.) Ubicación de las viviendas; (b.) Agrupación de las viviendas; (c.) Evidencia de infiltración de agua en las viviendas; (d.) Viviendas en la franja de retiro. (e.) Necesidades básicas insatisfechas por municipio (NBI).

Elaboración propia

Por otra parte, la figura 10 muestra la representación geoespacial de los indicadores de población migrante y empleo informal en la zona, actividad económica en la franja de retiro y tráfico promedio diario en el corredor vial. En la parte superior de la figura 9 se observa la ausencia de población migrante y de empleo informal, lo que disminuye la incidencia de los factores de fragilidad y baja resiliencia en el corredor vial. La parte inferior de la figura 10 muestra los aspectos económicos de actividad económica en la franja de retiro y tráfico promedio diario en el corredor vial, los cuales miden la exposición por la presencia de actividades económicas simultaneas en la zona, como la agricultura, ganadería, comercio, industria y minería, y el grado de dependencia económica al corredor. En el primer caso se identifica que las actividades productivas con mayor frecuencia son la agricultura, la ganadería y el comercio, y que se presentan de forma simultánea dos actividades productivas máximo, de otro lado el indicador de tráfico promedio diario aproxima una medida de dependencia al corredor vial por movilidad de pasajeros (porcentaje de vehículos particulares de pasajeros y buses), este indicador registra un nivel bajo en el corredor vial (umbral entre 0% y 40%), por lo que no existe dependencia al corredor vial.

Figura 10. Representación geoespacial de aspectos económicos en el corredor vial



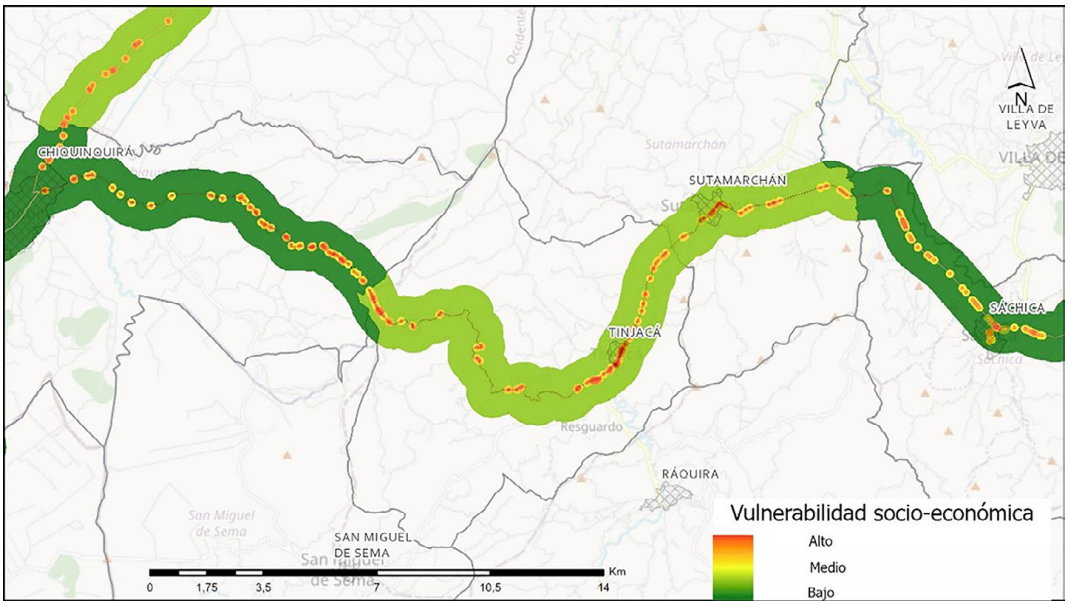
(a.) Presencia transitoria o permanente de población migrante; (b.) Empleo informal; (c.) Actividad económica en la franja de retiro; (d.) Trafico promedio diario en el corredor vial

Elaboración propia

A partir de los resultados anteriores, la superposición de capas, la evaluación de la vulnerabilidad y de la propuesta metodológica de este trabajo, presentada en los apartados de “Factores socioeconómicos en el cálculo del riesgo por inundación” y “Modelo geoespacial y estructura de los datos” de la metodología, se calculó el Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales (IASEG) como aproximación a la vulnerabilidad socioeconómica por ocurrencia de inundación en el corredor vial “Ruta 6008, Transversal Puerto Boyacá-Monterrey-Chiquinquirá-Sáchica, Grupo 2, PR 0 a PR 37”. Los resultados se presentan en la figura 11, cabe resaltar que el nivel de agregación de la información se dio a partir de la integración de capas con diferentes escalas, por lo que se organizó la información para el análisis espacial, en tres grupos en función al nivel de detalle de su representación espacial, ellos son: regional, zonal y local. Con este referente se puede observar la representación de los puntos a nivel local y la representación de franja para la sumatoria del nivel regional y zonal. Como se puede observar el nivel de vulnerabilidad global es bajo en el nivel regional y zonal, mientras que, en el nivel local se aprecia una densidad mayor de puntos con vulnerabilidad media y alta, esto debido

principalmente a los factores de exposición, fragilidad y capacidad de respuesta (resiliencia) en el componente social, es decir, en los componentes de condiciones de las viviendas y condiciones y medios de vida de la población.

Figura 11. Vulnerabilidad socioeconómica por ocurrencia de inundación en el corredor vial Chiquinquirá-Sáchica



Elaboración propia

4. Discusión de resultados

Los resultados del estudio revelan que, a escala local, es decir, en el corredor vial y la franja de retiro, la vulnerabilidad se ubica en el rango medio-alto, esto se explica principalmente por la densidad de población presente en el corredor vial y la franja de retiro tanto por la presencia de actividades económicas como por la presencia permanente por la ubicación de las viviendas, que sumado a la presencia de sitios susceptibles y puntos críticos por causa de fenómenos de inundación elevan el riesgo. El método propuesto es este trabajo es comparable con las propuestas metodológicas realizadas por otros autores, como por ejemplo, el estudio realizado por Hinojos et al. (2023), en este estudio los autores demuestran como la integración de escalas de información en un índice resulta determinante para la cuantificación de la vulnerabilidad; los autores seleccionan tres escalas de información: escala de condado, distrito y grupo de bloque del censo de EE. UU (Hinojos et al., 2023), con el fin de cuantificar un índice de vulnerabilidad social y exposición a inundaciones en la costa de Virginia, EE. UU, encontrado que la mayor proporción de población en la zona de estudio se encuentra en el rango de vulnerabilidad medio a alto, aunque el estudio de Hinojos y otros se realiza para una ciudad costera, lo que difiere de este estudio al analizar la vulnerabilidad en corredores viales, los dos enfoques tienen en común la agregación de información discriminada por escalas para la construcción de un índice de vulnerabilidad.

Por otra parte, otro estudio a nivel urbano y que emplea metodológicamente el enfoque de georreferenciación, es el estudio realizado por Chang et al. (2021), en este trabajo los autores abordan la vulnerabilidad de sistemas socioecológicos-tecnológicos (SETS) a partir de la construcción de un índice de vulnerabilidad a inundaciones urbanas para seis ciudades de Estados Unidos; esto autores encuentran evidencia de que las áreas más densamente pobladas se correlacionan con valores más altos de la vulnerabilidad social, lo que ocurre de igual forma con el índice propuesto en este trabajo, no obstante aunque en el trabajo de Chang y otros y en este trabajo se calcula un índice de vulnerabilidad por inundación, los resultados no son comparables puesto que la propuesta de Chang et al. (2021) agrega tres subíndices: vulnerabilidad social, vulnerabilidad ecológica y vulnerabilidad tecnológica, mientras que en este trabajo se agregan dos subíndices: vulnerabilidad social y vulnerabilidad económica específicamente para corredores viales. A pesar de esta diferencia metodológica, la construcción de indicadores sigue un planteamiento común, por lo que se evidencia un rasgo común en el enfoque metodológico abordado en este trabajo y los planteamientos metodológicos encontrados en la revisión de literatura, validando el uso de sistemas de georreferenciación y la agregación de escalas de medición para calcular un índice de vulnerabilidad social.

De otro lado, además de la utilización de datos geoespaciales, otros estudios han aplicado el proceso analítico jerárquico (AHP) para la construcción de indicadores, como el caso de Das (2020), que utiliza el análisis geoespacial y el proceso analítico jerárquico para construir indicadores ambientales y socioeconómicos para cuantificar de un índice de vulnerabilidad por inundación, realizando un mapeo de susceptibilidad a inundaciones; entre los parámetros socioeconómicos utiliza la densidad de población y la densidad de carreteras entre otros aspectos para computar mapas de susceptibilidad, vulnerabilidad y riesgo de inundaciones en una zona costera. El abordaje del método AHP también es empleado en este trabajo para establecer el conjunto de factores sociales y económicos que hacen parte en la medición de la vulnerabilidad socioeconómica en los corredores viales ante la presencia de una amenaza de origen natural en los corredores viales. A pesar tener un propósito y zona de estudio distintos, el estudio de Das (2020) emplea el análisis geoespacial, la integración de la información en capas superpuestas de georreferenciación y la utilización del método AHP para la construcción de indicadores, lo cual está en correspondencia con el enfoque abordado en esta investigación, validando los métodos utilizados en este trabajo.

Finalmente, la utilización de escalas de agregación de datos geoespaciales, aunque es una técnica ampliamente utilizada como lo muestra Sauer et al. (2023) al documentar las técnicas más utilizadas para mapear la vulnerabilidad a las inundaciones en los países en desarrollo, suele ser empleada para el estudio a nivel de ciudad como unidad territorial, es decir desde una escala a nivel comunitario o local; si bien los enfoques de análisis multicriterio basados en indicadores y sistemas de información geográfica (SIG) se utilizan de forma común para mapear la vulnerabilidad a las inundaciones (Sauer et al., 2023), este estudio se diferencia por utilizar como unidad de análisis un corredor vial y la superposición de escalas de análisis local, zonal y regional, es decir, que el análisis de la vulnerabilidad no se limita a un lugar o población (ciudad), sino que se extiende a través del territorio y la conexión con poblaciones delimitado por el la extensión y dirección de los corredores viales.

En síntesis, los métodos empleados y la propuesta metodológica de este trabajo son consistente con la literatura y aportan información adicional para la identificación de rasgos o patrones que afectan la vulnerabilidad socioeconómica en los corredores viales; como lo expone De Las Heras et al. (2020), al afirmar que, determinar patrones espaciales es un aspecto fundamental para la comprensión de cualquier fenómeno y en la propuesta de posibles medidas correctivas para su solución al determinar y delimitar las áreas más desfavorecidas. Es decir, que el modelo propuesto en este trabajo permite identificar la tendencia y patrón espacial referidos a la vulnerabilidad socioeconómica que se pueden presentar por una eventual amenaza por inundación en los corredores viales.

5. Conclusiones

La pérdida de transitabilidad por un evento de inundación no solamente genera efectos sobre la economía del país sino también en aspectos sociales y económicos pues altera directamente las dinámicas propias de cada territorio. Es por esto que la gestión del riesgo sobre los corredores viales requiere de un conocimiento detallado de la red, y para ello, herramientas geoespaciales aportan considerablemente en la articulación precisa de datos e información generada en cada corredor en tiempo real. Cada tramo de vía presenta unas condiciones particulares, por tanto, el propósito de analizar el área geográfica donde se localiza la infraestructura vial es poder aprovechar el conocimiento de los administradores viales en sus respectivos tramos, y poder documentar por observación directa las características tanto biofísicas como sociales y económicas que se manifiesten.

Se pudo constatar que la mejor forma de incorporar nuevos datos que alimenten los análisis espaciales es a través del reporte oportuno de los administradores viales en cada uno de sus tramos mediante un formulario que almacene la observación bajo unos descriptores que han sido diseñados, revisados y evaluados por cada grupo de expertos respectivamente, evitando pasos intermedios para la visualización de los trabajos en campo.

El trabajo permanente con los administradores viales para la integración de aspectos sociales y económicos, así como el entrenamiento en el uso del modelo para captura de información, y las sesiones de retroalimentación, fueron esenciales para depurar, perfeccionar y validar los indicadores y categorías de respuesta para la captura de información socioeconómica.

La metodología puede ser replicable en otros corredores viales para tener un mayor y mejor conocimiento de los factores de inciden en la vulnerabilidad socioeconómica, y poder construir en distintas escalas (local,

zonal y regional) mapas de vulnerabilidad que pueda servir a los administradores viales en la identificación los sitios con mayores vulnerabilidades.

La metodología también puede ser replicable en distintos contextos de la red vial de manera que los resultados puedan servir a los formuladores de políticas para contar con información confiable, precisa y oportuna para la construcción de estrategias de mitigación e intervención de la vulnerabilidad socioeconómica. Además, los hallazgos de este estudio ofrecen elementos esenciales para la planificación y la reducción de la vulnerabilidad por exposición, fragilidad y resiliencia (adaptabilidad) en los corredores viales.

Financiación

Esta publicación fue posible teniendo en cuenta los resultados del proyecto “Aplicación de metodologías para análisis cualitativo del riesgo con enfoque multiamenaza en la infraestructura de transporte, incluyendo variables de tipo ambiental y social que inciden en su valoración; como herramienta técnica para la generación de lineamientos para la evaluación cualitativa del riesgo en corredores viales, a escala regional, zonal y local”. Convenio especial de cooperación 949 de 2021 financiado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Vías de Colombia - INVIAS, la Universidad de La Salle y la Universidad del Quindío, por su apoyo en el desarrollo la investigación.

Referencias

Ayala, F. & Olcina, J. (2002). *Riesgos naturales* (1st ed.). España: Ariel S.A.

Banco Mundial (2003). Social Risk Management: The World Bank's Approach to Social Protection in a Globalizing World, Social Protection Department, Washington, D.C.

Botello, S. (2017). *Avances del rediseño del índice de pobreza multidimensional de Colombia. Indicadores no monetarios de pobreza: avances y desafíos para su medición*. Santiago: CEPAL, 2017. LC/TS. 2017/149. 117-124.

Cannon, T. (2003). "*Vulnerability Analysis, Livelihoods and Disasters Components and variables of vulnerability: modelling and analysis for disaster risk management*", IADB/IDEA Program on Indicators for Disaster Risk Management. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. http://idea.unalmzl.edu.co

Carreño, M. L., Cardona, O. D., & Barbat, A. H. (2005). Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos. Monografía CIMMNE IS-52, 166. https://doi.org/10.13140/2.1.1658.4003

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2002). *Vulnerabilidad sociodemográfica: viejos y nuevos riesgos para comunidades, hogares y personas*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/13051/S2002632_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Chang, H., Pallathadka, A., Sauer, J., Grimm, N. B., Zimmerman, R., Cheng, C., Iwaniec, D. M., Kim, Y., Lloyd, R., McPhearson, T., Rosenzweig, B., Troxler, T., Welty, C., Brenner, R., & Herreros-Cantis, P. (2021). Assessment of urban flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework in six US cities. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102786. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102786

Das, S. (2020). Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100379. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100379

De Las Heras, D., Adame, S., Cadena, E. G., & Campos, J. (2020). Análisis espacial del Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana en la Megalópolis de México. *Investigaciones Geográficas*, (73), 147–169. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.HGAMCVCA

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2007). *Una aproximación a la vulnerabilidad.* https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Social/boletin34_1.pdf

Feres, J. C. & Mancero, X. (2001). E*l método de las necesidades básicas insatisfechas (NBI) y sus aplicaciones en América Latina*. Cepal.

Fresneda Bautista, O. (2007). *La medida de necesidades básicas insatisfechas (NBI) como instrumento de medición de la pobreza y focalización de programas*. Cepal.

Gutiérrez, E. R., Caro, J. L., & Lara, Y. A. (2014). Las unidades agrícolas familiares (UAF), un instrumento de política rural en Colombia. *Tecnogestión: Una mirada al ambiente*, *11*(1).

Hinojos, S., McPhillips, L., Stempel, P., & Grady, C. (2023). Social and environmental vulnerability to flooding: Investigating cross-scale hypotheses [Article]. *Applied Geography*, 157, 12, 103017. https://doi-org.hemeroteca.lasalle.edu.co/10.1016/j.apgeog.2023.103017

Koks, E. E., Rozenberg, J., Zorn, C., Tariverdi, M., Vousdoukas, M., Fraser, S. A., Hall, J. W. & Hallegatte, S. (2019). *A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. Nature communications*, *10*(1), 2677. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3

Ley 1228 de 2008. Por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión, para las carreteras del sistema vial nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras y se dictan otras disposiciones. 16 de julio de 2008. D.O. No. 47.052.

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. 24 de abril de 2012. D.O. No.48411.

Lozano-Povis, Arlitt, Alvarez-Montalván, Carlos E., & Moggiano, Nabilt. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria, 12*(1), 101-108. https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012

Moser, C. O. (1998). The asset vulnerability framework: Reassessing urban poverty reduction strategies. *World Development*, *26*(1), 1–19. https://doi.org/10.1016/S0305-750X(97)10015-8

Organización Internacional para las Migraciones. (2006). *Derecho Internacional sobre Migración*. Glosario sobre Migración. OIM. https://publications.iom.int/system/files/pdf/iml_7_sp.pdf

Owusu, M. & Nursey-Bray, M. (2019). Socio-economic and institutional drivers of vulnerability to climate change in urban slums: the case of Accra, Ghana. *Climate and Development, 11*(8), 687–698. https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1532870

Perles, M.J., Pardo, S., Mérida, M., & Olcina, J. (2019). Metodología para la predicción de puntos de riesgos múltiples en infraestructuras viarias tras episodios torrenciales (road-risk). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 2615, 1–40. http://dx.doi.org/10.21138/bage.2615

Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G., & Maroof, A. S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International journal of disaster risk reduction*, *14*(4), 470-486. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.09.013

Rufat, S., Tate, E., Emrich, C. T., & Antolini, F. (2019). How valid are social vulnerability models? *Annals of the American Association of Geographers*, *109*(4), 1131-1153. https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1535887

Saaty, T. (1980). *Multicriteria decision Making: The analytic hierarchy process.* McGraw Hill.

Saaty, T. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, *48*(1), 9-26. https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I

Saldaña-Zorrilla, S. O. (2006). *Reducing economic vulnerability in Mexico. Natural disasters, foreign trade and agriculture* [Doctoral dissertation, WU Vienna University of Economics and Business]. Repositorio institutional WU Vienna Research. https://research.wu.ac.at/en/publications/reducing-economic-vulnerability-in-mexico-natural-disasters-forei-3

Sánchez-González, D. & Egea-Jiménez, C. (2011) Enfoque de vulnerabilidad social para investigar las desventajas socioambientales: Su aplicación en el estudio de los adultos mayores. *Papeles de Población, 17*(69), 151–185. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252011000300006&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Sauer, J., Pallathadka, A., Ajibade, I., Berbés-Blázquez, M., Chang, H., Cook, E. M., Grimm, N., Iwaniec, D. M., Lloyd, R., & Post, G. C. (2023). Relating social, ecological, and technological vulnerability to future flood exposure at two spatial scales in four US cities. *Sustainable Cities and Society*, 104880. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4204468

Sedano-Cruz, K., Carvajal-Escobar, Y., & Ávila-Díaz, Á. (2013). Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. *Semillas, 46*, *47*-53. https://www.researchgate.net/profile/Alvaro-Avila-Diaz-2/publication/281015880_Variabilidad_climatica_cambio_climatico_y_gestion_integrada_del_riesgo_de_inundaciones_en_Colombia/links/55d5d6e308aec156b9a5ad1c/Variabilidad-climatica-cambio-climatico-y-gestion-integrada-del-riesgo-de-inundaciones-en-Colombia.pdf

Silva-Burgos, L. & Barriga, O. (2009). Creación de un índice de vulnerabilidad social para la Provincia de Concepción desde una perspectiva teórico-empírica. *Sociedad Hoy*, 16, 59-76. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90217096005

Tascón-González, L., Ferrer-Julià, M., Ruiz, M., & García-Meléndez, E. (2020). *Social vulnerability assessment for flood risk analysis*. *Water, 12*(2), 558. https://doi.org/10.3390/w12020558

Tate, E., Rahman, M. A., Emrich, C. T., & Sampson, C. C. (2021). *Flood exposure and social vulnerability in the United States. Natural Hazards*, *106*(1), 435-457. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04470-2

Thomas, D. S., Phillips, B. D., Lovekamp, W. E., & Fothergill, A. (Eds.). (2013). *Social vulnerability to disasters*. CRC press. https://doi.org/10.1201/b14854

Vera, J. M. & Albarracín, A. P. (2015). *Propuesta metodológica para el análisis y espacialización de la vulnerabilidad ante amenazas hidroclimáticas, para la gestión integral del riesgo en la planificación ambiental de cuencas hidrográficas* [Master's Thesis, Universidad del Tolima]. Repositorio institucional. https://repository.ut.edu.co/entities/publication/7eaf4fac-4e1d-4eec-87c3-92412d139f02

Wilches, G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional: herramientas para la crisis.* Popayan, Cauca, Colombia. Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA.

Wilches, G. (1993). La vulnerabilidad global. In A. MASKREY (Comp.), *Los desastres no son naturales*. Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina. https://www.gub.uy/sistema-nacional-emergencias/sites/sistema-nacional-emergencias/files/documentos/publicaciones/La+vulnerabilidad+social%20WILCHES+CHAUX.pdf