



**Análisis de la vulnerabilidad socioeconómica ante la amenaza de inundaciones en ciudades latinoamericanas. Caso de estudio, Medellín, Colombia**

Isabel Cristina García Bonilla

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera sanitaria

Asesor Neiler de Jesús Medina Peña, PhD

Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Ingeniería Sanitaria

Medellín

2024

<b>Cita</b>	(García Bonilla, 2024)
<b>Referencia</b>	García Bonilla, I.C (2024). <i>Análisis de la vulnerabilidad socioeconómica ante la amenaza de inundaciones en ciudades latinoamericanas. Caso de estudio, Medellín, Colombia</i>
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	[Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Julio César Saldarriaga Molina.

**Jefe departamento:** Lina Maria Berrouet Cadavid.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## TABLA DE CONTENIDO

<i>Resumen</i> .....	6
<i>Abstract</i> .....	7
<i>1 Introducción</i> .....	8
<i>2 Objetivos</i> .....	10
<i>2.1 Objetivo General</i> .....	10
<i>2.2 Objetivos Específicos</i> .....	10
<i>3 Marco Teórico</i> .....	11
<i>3.1 Evaluación de vulnerabilidad</i> .....	11
<i>3.2 Índice de Vulnerabilidad</i> .....	12
<i>3.3 Inundaciones extremas y cambio climático</i> .....	14
<i>3.3.1 Inundaciones de aguas subterráneas</i> .....	15
<i>3.3.2 Inundaciones fluviales</i> .....	16
<i>3.3.3 Inundaciones pluviales</i> .....	16
<i>3.3.4 Inundaciones costeras</i> .....	16
<i>3.3.5 Inundaciones en Colombia</i> .....	16
<i>4 Caso de Estudio</i> .....	18
<i>4.1 Inundaciones por precipitaciones extremas en la ciudad de Medellín</i> .....	19
<i>5 Metodología</i> .....	23
<i>5.1 Recolección de datos</i> .....	23
<i>5.1.1 Datos censo nacional</i> .....	23
<i>5.1.2 Encuesta calidad de vida</i> .....	24
<i>5.1.2.1 Cálculo de mínimo encuestados</i> .....	25
<i>5.1.3 Datos adicionales</i> .....	26
<i>5.2 Índice de vulnerabilidad</i> .....	27

5.2.1	<i>Metodología de selección de artículos de interés</i> .....	27
5.2.2	<i>Desarrollo del índice de vulnerabilidad</i> .....	27
5.2.2.1	<i>Susceptibilidad</i> .....	28
5.2.2.2	<i>Falta de capacidad de resistencia</i> .....	33
5.2.2.3	<i>Falta de capacidad de adaptación</i> .....	36
5.2.2.4	<i>Vulnerabilidad</i> .....	37
5.3	<i>Mapeo</i> .....	38
6	<i>Resultados y análisis</i> .....	39
6.1	<i>Susceptibilidad</i> .....	39
6.2	<i>Resistencia</i> .....	42
6.3	<i>Adaptación</i> .....	46
6.4	<i>Vulnerabilidad</i> .....	48
6.4.1	<i>Índice ideal</i> .....	55
7	<i>Conclusiones</i> .....	60
8	<i>Referencias</i> .....	65

## TABLA DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Correspondencia entre códigos y nombres de comunas y corregimientos</i> .....	18
Tabla 2.	<i>Cálculo mínimo de encuestados</i> .....	25
Tabla 3.	<i>Top de comunas y corregimientos con rango de susceptibilidad "Muy alto"</i> ....	41
Tabla 4.	<i>Top de comunas y corregimientos con rango de resistencia "Muy alto"</i> .....	45
Tabla 5.	<i>Top de comunas y corregimientos con rango de adaptación "Muy alto"</i> .....	48
Tabla 6.	<i>Top de comunas y corregimientos con rango de vulnerabilidad "Muy alto"</i> .....	54
Tabla 7.	<i>Índice ideal</i> .....	57
Tabla 1-A.	<i>Susceptibilidad en factores</i> .....	62

Tabla 2-A. <i>Falta de capacidad de resistencia en factores</i> .....	62
Tabla 3-A. <i>Falta de capacidad de adaptación en factores</i> .....	63
Tabla 4-A. <i>Vulnerabilidad en componentes</i> .....	64

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. <i>División político-administrativa de la ciudad de Medellín</i> .....	19
Figura 2. <i>Mapa de amenazas por inundación en la ciudad de Medellín</i> .....	22
Figura 3. <i>Esquema componente de susceptibilidad</i> .....	28
Figura 4. <i>Esquema componente de falta de capacidad de resistencia</i> .....	34
Figura 5. <i>Esquema componente de Adaptación</i> .....	36
Figura 6. <i>Esquema de Vulnerabilidad</i> .....	38
Figura 7. <i>Mapa de susceptibilidad ciudad de Medellín</i> .....	39
Figura 8. <i>Mapa de falta de capacidad de resistencia ciudad de Medellín</i> .....	43
Figura 9. <i>Mapa de falta de capacidad de adaptación ciudad de Medellín</i> .....	46
Figura 10. <i>Mapa de vulnerabilidad ciudad de Medellín</i> .....	49
Figura 11. <i>Cuadro comparativo</i> .....	50

## TABLA DE ACRONIMOS

<b>ECV 2022</b>	<i>Encuesta Calidad de vida 2022</i>
<b>IPCC</b>	<i>Panel intergubernamental del cambio climático por sus siglas en ingles “Intergovernmental Panel on Climate Change”</i>
<b>PEVI</b>	<i>Índice de vulnerabilidad PEARL por sus siglas en ingles “PEARL Vulnerability Index”</i>
<b>SOVI</b>	<i>Índice de vulnerabilidad social por sus siglas en inglés “Social Vulnerability Index”</i>

## RESUMEN

En el presente informe se da cuenta de una investigación que abordó la integración de la vulnerabilidad socioeconómica en el análisis de los riesgos asociados a inundaciones extremas en Medellín, Colombia. A través de un enfoque multidisciplinario, se recopilan datos sobre susceptibilidad, resistencia, adaptación y vulnerabilidad en diversas áreas de la ciudad, tras computar una amplia gama de factores y variables que configuran la vulnerabilidad total de la región. En un contexto de crecientes riesgos de inundaciones derivados del cambio climático y la urbanización acelerada, comprender la vulnerabilidad se vuelve crucial para los esfuerzos en mitigación de desastres en Colombia.

Este estudio propone la creación de un índice cuantitativo destinado a caracterizar la vulnerabilidad socioeconómica de la población urbana en Colombia, con el objetivo de ofrecer resultados accesibles a la comunidad para prevenir y mitigar las consecuencias de eventos climáticos extremos. Se identifican metodologías, factores y técnicas para evaluar la vulnerabilidad frente a inundaciones en Medellín, destacando la importancia de comprender la vulnerabilidad social para el diseño de planes específicos y la sensibilización de la población local sobre los riesgos climáticos.

Se reconoce que las comunidades se ven ampliamente influenciadas por factores socioeconómicos que determinan su vulnerabilidad ante eventos ambientales, y que la desigualdad social y ambiental agrava esta vulnerabilidad, especialmente en contextos con altos niveles de disparidad como Colombia. En este sentido, el desarrollo de un índice de vulnerabilidad socioeconómica emerge como una herramienta crucial para evaluar y gestionar eficazmente el riesgo de desastres naturales. Los índices de vulnerabilidad social se perfilan como herramientas esenciales para comprender y abordar diversas formas de vulnerabilidad, incluida aquella asociada al cambio climático.

**Palabras clave:** Evaluación de vulnerabilidad; Índice de Vulnerabilidad; inundaciones extremas y cambio climático; Medellín, Colombia.

## **ABSTRACT**

This research addresses the integration of socioeconomic vulnerability in the analysis of risks associated with extreme floods in Medellín, Colombia. Through a multidisciplinary approach, data on susceptibility, resilience, adaptation and vulnerability are collected in various areas of the city, after computing a wide range of factors and variables that shape the total vulnerability of the region. In a context of increasing flood risks resulting from climate change and accelerated urbanization, understanding vulnerability becomes crucial for disaster mitigation efforts in Colombia.

The research proposes the creation of a quantitative index to characterize the socioeconomic vulnerability of the urban population in Colombia, with the objective of providing accessible results to the community to prevent and mitigate the consequences of extreme weather events. Methodologies, factors and techniques to assess vulnerability to floods in Medellín are identified, highlighting the importance of understanding social vulnerability for the design of specific plans and raising awareness of the local population on climate risks.

It is recognized that communities are largely influenced by socioeconomic factors that determine their vulnerability to environmental events, and that social and environmental inequality aggravates this vulnerability, especially in contexts with high levels of disparity such as Colombia. In this sense, the development of a socioeconomic vulnerability index emerges as a crucial tool to effectively assess and manage natural disaster risk. Social vulnerability indices emerge as essential tools for understanding and addressing various forms of vulnerability, including that associated with climate change.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones representan una amenaza significativa y un factor crucial de riesgo en numerosas regiones del mundo, desencadenadas por una variedad de factores que incluyen eventos climáticos extremos, cambios en los patrones de precipitación, la topografía local y la gestión del agua. Estos eventos pueden tener consecuencias graves para las comunidades, como la pérdida de vidas humanas, daños a la propiedad, interrupción de servicios básicos y repercusiones en la salud pública.

El riesgo asociado a las inundaciones se define como la combinación de tres elementos: amenaza, exposición y vulnerabilidad (Paranunzio et al., 2022). Sin embargo, es esencial comprender que la vulnerabilidad es un concepto multifacético que abarca no solo aspectos medioambientales, geográficos, sociales, económicos sino también la compleja historia del desarrollo de una región. La distribución desigual de recursos económicos es crucial para determinar quiénes enfrentan situaciones de riesgo. Además, el carácter institucional, gubernamental y civil también influye en gran medida, ya que las políticas y la capacidad de respuesta de las instituciones pueden ser determinantes en la mitigación o exacerbación de la vulnerabilidad (Roncancio et al., 2020).

Otros factores por considerar al medir la vulnerabilidad en una comunidad incluyen la ubicación geográfica (Roy & Blaschke, 2015), la infraestructura de mitigación de inundaciones, la planificación urbana (Y. Chen et al., 2021), la preparación ante desastres (Hossain & Paul, 2018), los sistemas de gestión de riesgos (Sahar et al., 2020), el acceso a información y los niveles de educación (Medina et al., 2020), entre otros. Por tanto, es crucial investigar y comprender la relación entre las inundaciones y la vulnerabilidad socioeconómica de un lugar, ya que constituye un paso fundamental para reducir riesgos y proteger a las comunidades vulnerables (Roder et al., 2017).

En general, las metodologías empleadas para evaluar la vulnerabilidad se integran en el marco de la evaluación de riesgos y difieren según su enfoque y propósito (Sorg et al., 2018). Una de las metodologías más conocidas es la generación de índices que permiten caracterizar una población específica (Tascón-González et al., 2020). Por tanto, es conveniente realizar una caracterización adecuada de la comunidad que habita en las comunas y corregimientos de la ciudad de Medellín, lo que permitirá generar un mapeo que represente de manera precisa las variables



Análisis de la vulnerabilidad socioeconómica ante la amenaza de inundaciones en ciudades latinoamericanas. Caso de estudio, Medellín, Colombia

principales contenidas en el índice. Este enfoque tiene como objetivo final entregar resultados comprensibles a la población, con el fin de mitigar y prevenir las consecuencias de los eventos extremos causados por inundaciones (Sorg et al., 2018).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Proponer una metodología para llevar a cabo una valoración cuantitativa por medio de índices, de la vulnerabilidad socioeconómica en el contexto y particularidades presentes en territorios urbanos colombianos, para ser usado en la evaluación de riesgo por inundaciones.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar las diferentes metodologías usadas para caracterizar la vulnerabilidad socioeconómica ante el riesgo de inundación urbana en las comunas y corregimientos de la ciudad de Medellín, Colombia.
- Identificar los principales factores y variables usados para caracterizar la vulnerabilidad socioeconómica ante el riesgo de inundación urbana en una población latinoamericana.
- Identificar las principales técnicas empleadas para la recolección y captura de información en estudios relacionados con la caracterización de la vulnerabilidad socioeconómica en una zona urbana con potencial riesgo de inundación.
- Identificar las principales técnicas empleadas para la representación y mapeo en estudios relacionados con la caracterización de la vulnerabilidad socioeconómica a inundaciones urbanas.

### 3 MARCO TEÓRICO

En la comunidad científica, no existe una única definición de vulnerabilidad, ya que esta puede variar según el propósito del estudio y debe contextualizarse en relación con una situación de riesgo específica. En el ámbito de la vulnerabilidad socioeconómica ante amenazas naturales, una definición comúnmente adoptada proviene del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Según el IPCC, la vulnerabilidad se refiere a la propensión o predisposición de un sistema a ser afectado negativamente y abarca tres dimensiones principales: susceptibilidad al daño, falta de capacidad para afrontarlo y falta de capacidad para adaptarse. En resumen, la vulnerabilidad según el IPCC se define como el grado en que un sistema es susceptible a los efectos adversos y carece de la capacidad para hacerles frente y recuperarse de ellos (Medina et al., 2020).

#### 3.1 Evaluación de vulnerabilidad

En diversos campos, especialmente en los estudios que exploran el impacto del cambio climático y sus diversas manifestaciones ambientales como inundaciones, sequías, entre otros, comprender la vulnerabilidad social es esencial (Koyell Sam & Namitaa Chakma, 2021). Como concepto, la vulnerabilidad social describe combinaciones de procesos sociales, culturales, económicos, políticos e institucionales que dan forma a las diferencias socioeconómicas en la experiencia y la recuperación de las amenazas. Por tal motivo, las medidas cuantitativas de vulnerabilidad social se utilizan ampliamente en la investigación y la práctica (Spielman et al., 2020), lo cual implica un análisis detallado de los múltiples aspectos que hacen que una comunidad o sistema sea vulnerable a sufrir daños, teniendo en cuenta los elementos en riesgo, su exposición a amenazas físicas y sus características sociales, así como su capacidad de resistencia y adaptación ante dichos eventos (Karagiorgos et al., 2016). Evaluar la vulnerabilidad a nivel local es fundamental, pues esto ayuda a las autoridades a desarrollar planes específicos y a sensibilizar a la población local sobre los riesgos climáticos, permitiéndoles adaptarse mejor a las condiciones cambiantes (Koyell Sam & Namitaa Chakma, 2021).

En la investigación actual, la perspectiva que destaca los factores socioeconómicos de una comunidad en particular es ampliamente usada (Karagiorgos et al., 2016). Los factores socioeconómicos son cruciales para comprender la vulnerabilidad a los diferentes eventos ambientales, ya que a menudo determinan el alcance de la exposición y la capacidad para hacer frente a estos (Malakar & Mishra, 2017). Ahora bien, es importante destacar que la vulnerabilidad

no está distribuida de manera uniforme, y que, por lo general, las comunidades con menos acceso a recursos corren un riesgo particular debido a sus condiciones de vida y recursos limitados (OUOYA, 2021). Esto se ve exacerbado aún más por la desigualdad social y ambiental, que puede llevar a la no generación de adecuadas estrategias de adaptación (Navarro, 2017). Por lo tanto, estudiar la vulnerabilidad a través de una lente socioeconómica es esencial para una reducción y gestión eficaz del riesgo de desastres.

En el caso particular de Colombia, en los últimos diez años y con el aumento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos, el campo de la gestión de desastres ha experimentado un crecimiento notable, impulsado por intervenciones políticas y mayores inversiones. Sin embargo y a pesar de que la exposición a estos eventos puede ser similar entre diferentes grupos sociales, los impactos resultantes están determinados por la vulnerabilidad social y la capacidad de cada grupo para hacer frente a dichos peligros. Por lo tanto, en entornos con altos niveles de desigualdad social como el país colombiano, donde la distribución de la pobreza, el acceso a servicios de salud y el estatus social representan desafíos significativos para la supervivencia, seguridad y dignidad de las comunidades y sociedades, tanto antes, durante como después de los eventos naturales extremos (Roncancio et al., 2020), es crucial el desarrollo de un índice de vulnerabilidad socioeconómico para evaluar la vulnerabilidad a dichos eventos ambientales, ya que proporciona una comprensión integral de los impactos potenciales en las diferentes comunidades (Papathoma-Köhle et al., 2019).

### **3.2 Índice de Vulnerabilidad**

Los índices basados en la evaluación de la vulnerabilidad social son una herramienta valiosa para comprender y enfrentar diversas formas de vulnerabilidad (Papathoma-Köhle et al., 2019). Esta herramienta multidimensional se emplea para evaluar la susceptibilidad de varios sistemas a sufrir perturbaciones o daños, y su utilidad se extiende a una variedad de contextos (Torales et al., 2021); sin embargo, cada vez se reconoce más la vulnerabilidad social al cambio climático y están surgiendo propuestas para medirla y gestionarla (Nguyen et al., 2017). Dichos índices suelen integrar una serie de factores, como la exposición al riesgo, las capacidades internas y externas, así como las posibilidades de adaptación (Figueiredo et al., 2018). Estos elementos, a menudo, se combinan en una única puntuación, la cual puede utilizarse para priorizar la ayuda y prevención de desastres ante eventos climáticos (Chang et al., 2015).

Por esta razón, varios estudios subrayan la importancia de un índice de vulnerabilidad en eventos ambientales extremos: (Papathoma-Köhle et al., 2019) enfatizan en la necesidad de una evaluación integral de la vulnerabilidad física del entorno construido, particularmente en áreas montañosas propensas a inundaciones dinámicas; (Krstic et al., 2017) respaldan esto aún más, demostrando la eficacia de un enfoque basado en datos para cuantificar el riesgo de los vecindarios durante climas extremadamente cálidos; (Andrade & Szlafsztein, 2018) amplían este concepto para incluir componentes tangibles e intangibles en la composición del índice, como se ve en un estudio de caso de inundaciones repentinas en el Amazonas; mientras que (Zanetti et al., 2016) destacan la relevancia de un índice de vulnerabilidad al cambio climático para evaluar la vulnerabilidad socioambiental en las zonas costeras, particularmente en el contexto del aumento del nivel del mar y eventos de lluvias extremas. Estos estudios subrayan colectivamente el papel fundamental de un índice de vulnerabilidad para comprender y mitigar el impacto de los eventos ambientales extremos.

En la actualidad, el indicador cuantitativo más utilizado es el Índice de Vulnerabilidad Social (SoVi, por sus siglas en inglés) (Spielman et al., 2020), desarrollado inicialmente para Estados Unidos. Este índice se basa en el análisis de componentes principales (PCA), lo que permite evaluar la vulnerabilidad social en diferentes contextos geográficos (de Loyola Hummell et al., 2016). El SoVI se utiliza con frecuencia para comparar unidades geográficas en función de sus niveles relativos de vulnerabilidad. Los límites superior e inferior del índice representan los niveles más altos y bajos de vulnerabilidad, respectivamente; así mismo, el enfoque SoVI se ha aplicado en muchos lugares del mundo y ha inspirado otros indicadores cuantitativos de vulnerabilidad social (Spielman et al., 2020), este es el caso del índice de vulnerabilidad social conocido como PeVI y que fue implementado en la Isla de Sint Marteen luego del paso del huracán Irma en 2017 (Medina et al., 2020).

El PeVI, en particular, fue diseñado para ser flexible y fácilmente adaptable, con el objetivo de reflejar con precisión la información disponible y las necesidades específicas de cada caso de estudio. Este índice se basa en diversos indicadores y comprende tres componentes principales: susceptibilidad, falta de capacidad de resistencia y carencia de habilidades de adaptación (Medina et al., 2020). La utilización de estos componentes es crucial para proporcionar información significativa sobre la vulnerabilidad de las regiones más susceptibles, las áreas con menor

resistencia y los municipios con menor capacidad de adaptación después de un evento extremo (Wu et al., 2016).

En líneas generales, como se mencionó previamente, estos índices son útiles en diversos contextos, como el político, de seguridad y salud, entre otros. Sin embargo, debido a los impactos cada vez más evidentes del cambio climático en todo el mundo, varios estudios enfatizan la importancia de los índices de vulnerabilidad social en el contexto de fenómenos meteorológicos extremos causados por este fenómeno. (Török et al., 2021) resaltan la necesidad de un enfoque multidisciplinario para evaluar la vulnerabilidad, incorporando indicadores sociales, ambientales y de salud. Por otro lado (Luskova & Leitner, 2021) destacan el papel crucial de la infraestructura crítica en la vulnerabilidad de la sociedad, especialmente en los sectores de energía y transporte. Estos estudios demuestran colectivamente el valor de los índices de vulnerabilidad social para identificar y abordar los factores clave que contribuyen a la vulnerabilidad, así como para orientar los procesos de toma de decisiones destinados a aumentar la resiliencia y la capacidad de adaptación frente al cambio climático.

Para el caso colombiano, ya se han desarrollado diferentes índices para analizar los efectos del cambio climático, dado que el país tiene una economía principalmente agrícola y depende de condiciones específicas para sus cultivos, como se menciona en la investigación (Perez et al., 2020). Adicionalmente, y según (Roncancio et al., 2020), es importante destacar que se deben considerar cada una de las variables que definen un lugar de estudio específico, lo que implica incluir cada componente, factor y variable dentro del índice después de un análisis exhaustivo de la historia, la cultura y las características únicas de la comunidad de estudio, tipo de análisis permitido por el método PCA de componente principales.

### **3.3 Inundaciones extremas y cambio climático**

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha proyectado un aumento en las inundaciones extremas como consecuencia del cambio climático, indicando que las precipitaciones intensas serán más frecuentes e intensas con el calentamiento global adicional (IPCC, 2021). En la actualidad, este fenómeno está incrementando notablemente la frecuencia y la intensidad de las precipitaciones extremas, lo que aumenta el riesgo de inundaciones en cuencas pequeñas y áreas urbanas (Blenkinsop et al., 2021). Esta tendencia es particularmente evidente en los Estados Unidos, donde se proyecta que un escenario de

calentamiento elevado aumentará la exposición de la población al peligro de inundaciones hasta en un 127% (Swain et al., 2020). Además, el impacto del cambio climático en las precipitaciones e inundaciones extremas se ve agravado por la disponibilidad de agua, y la intensificación de estos fenómenos es más pronunciada en regiones con mayores niveles de humedad (Tabari, 2020). Esta situación tiene implicaciones significativas tanto para el medio ambiente como para las comunidades humanas, dado que las pérdidas económicas por inundaciones aumentan rápidamente en los países de bajos ingresos (Jongman et al., 2018). Además, el efecto del cambio climático en las inundaciones se ve exacerbado por la urbanización y la impermeabilización del suelo, las cuales puede modificar el equilibrio hídrico y aumentar la probabilidad de inundaciones locales (Krakowska, 2016). Estos hallazgos resaltan la urgente necesidad de implementar estrategias efectivas de mitigación y adaptación al cambio climático para hacer frente a la creciente amenaza de inundaciones extremas (Jongman et al., 2018).

Dado que las inundaciones pueden tener impactos significativos en la salud pública, el medio ambiente y el desarrollo urbano, es importante conocer y diferenciar los diferentes tipos de inundaciones, pues cada uno de ellos causan distintos daños humanos y materiales (Leal et al., 2018). Estos tipos incluyen inundaciones de aguas subterráneas, fluviales, pluviales y costeras, cada una con su propio conjunto de peligros y estrategias de remediación. A continuación, se mencionan todos los tipos de inundaciones, sin embargo, para el caso de estudio específico se tendrán en cuenta únicamente las de tipo pluvial y fluvial.

### **3.3.1 Inundaciones de aguas subterráneas**

Las inundaciones de este tipo pueden ocurrir en diversos entornos, por ejemplo, en los acuíferos aluviales conectados por ríos, donde el aumento de los niveles de estos puede generar un aumento del nivel freático, lo que produce inundaciones de aguas subterráneas (Abboud et al., 2017). En cuanto a las zonas urbanas, la mala gestión de las aguas subterráneas puede exacerbar el riesgo de inundaciones pluviales o fluviales por el aumento del nivel freático, con posibles impactos en la salud humana, el medio ambiente y las actividades económicas (Aicha O. et al., 2020). En consecuencia y después de eventos de recarga extremos, las inundaciones de aguas subterráneas pueden provocar una fertilización sustancial de los acuíferos con nutrientes, lo que afecta generalmente la estructura de los ecosistemas de aguas subterráneas (Reiss et al., 2019).

### **3.3.2 Inundaciones fluviales**

Causadas por descargas altas y rápidas de subcuencas, que se ven exacerbadas por inundaciones pluviales, particularmente en áreas urbanas con superficies impermeables y capacidad de drenaje insuficiente (Sertyesilisik, 2017). Estas pueden aumentar significativamente el número de propiedades afectadas (Muthusamy et al., 2020). Es necesaria una comprensión integral de las inundaciones fluviales, incluida su interacción con las inundaciones pluviales y el impacto de las actividades humanas (Wahid et al., 2021), permitiendo su gestión eficaz e integral.

### **3.3.3 Inundaciones pluviales**

Estas son causadas por lluvias intensas que logran sobrepasar el nivel límite de los sistemas de drenaje y son una preocupación creciente en las zonas urbanas (Prokić et al., 2019). A esta inquietud se le agrega la falta de cobertura (y varias veces calidad) en los registros de precipitación en muchas de estas zonas, lo que representa un desafío para el pronóstico de inundaciones de este tipo (Young et al., 2020).

### **3.3.4 Inundaciones costeras**

Las inundaciones costeras pueden ser causadas por una variedad de factores que incluyen el aumento de la descarga de los ríos, mareas fuertes y tormentas severas (Siegel, 2020), este es un proceso complejo influenciado por el aumento del nivel del mar, las mareas, el oleaje atmosférico, las condiciones de las olas marinas y el viento local (Idier et al., 2020). Actualmente también se ve altamente influenciado por los impactos provenientes del cambio climático.

### **3.3.5 Inundaciones en Colombia**

Como se ha reportado, la mayoría de los desastres que se presentan en Colombia se deben a inundaciones y deslizamientos, lo que determina altos niveles de exposición al riesgo tanto en la zona urbana como en la zona rural (Alcaldía de Medellín, 2022). Sin embargo, dada la variedad geográfica en Colombia, es frecuente experimentar inundaciones de todo tipo. En general, las fluviales y pluviales son especialmente comunes en áreas urbanas (Yang et al., 2020), mientras que las costeras, como su nombre lo indica, son predominantes en regiones cercanas al mar, fenómeno que se ve afectado directamente por la variabilidad del nivel del océano y que tiene tendencia al aumento (Genes et al., 2021). Además, Colombia enfrenta importantes desafíos en materia de gobernanza del agua, exacerbados por inundaciones extremas (Willems, 2020) y en los cuales la implementación de sistemas de alerta temprana de inundaciones se ve obstaculizada por



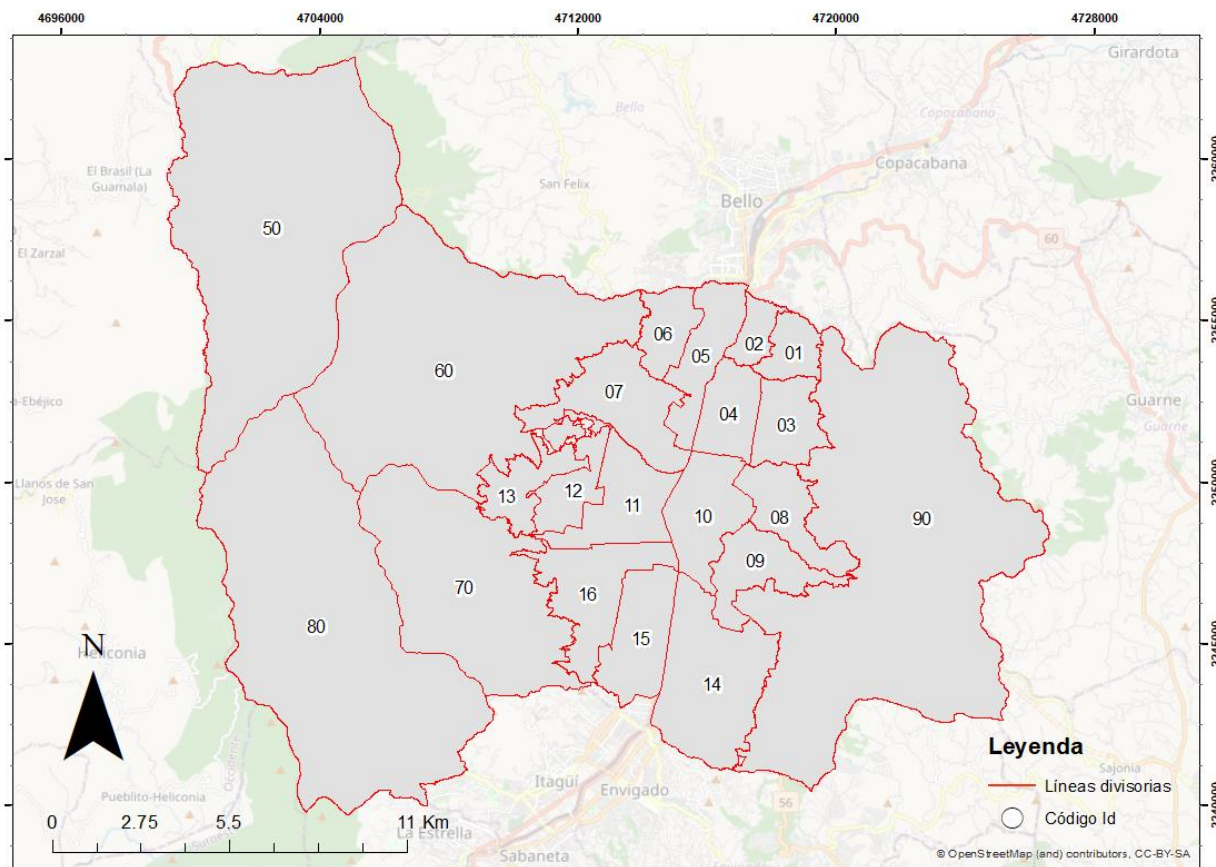
datos limitados y por el trabajo con software de modelización mal adaptado lo que deriva en un problema (Aguirre y Rivera, 2018) a la hora de estudiar a fondo este tipo de eventos, así como lo es la ausencia de un sistema nacional de previsión y alerta de inundaciones que se ha identificado como una debilidad en la gestión de los riesgos de inundaciones (Werner et al., 2016). Por este motivo, se destaca la necesidad de una evaluación integral de la vulnerabilidad que considere todos los tipos de inundaciones según el lugar de estudio.

#### 4 CASO DE ESTUDIO

La ciudad de Medellín se encuentra en el noroccidente de Colombia, sobre la cordillera central, a una altitud de 1.479 metros sobre el nivel del mar, en el Valle de Aburrá. Su extensión comprende 111,61 km<sup>2</sup> de suelo urbano, 263,04 km<sup>2</sup> de suelo rural y 1,75 km<sup>2</sup> de suelo de expansión. El río Medellín, que atraviesa la ciudad de sur a norte, es su principal cuenca hídrica, y la temperatura promedio es de 24°C. Medellín es la capital del departamento de Antioquia y constituye el núcleo territorial del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, limitando su territorio con 12 municipios: Heliconia, Angelópolis y Ebéjico al occidente; Guarne y Rionegro al oriente; Envigado, Itagüí, La Estrella y el Retiro al sur; y San Jerónimo, Bello y Copacabana al norte. La Figura 1 muestra como la ciudad está dividida político-administrativamente en 16 comunas en la zona urbana, estas están identificadas con un número o código para su fácil reconocimiento como se ilustra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** *Correspondencia entre códigos y nombres de comunas y corregimientos*

Código Id	Comuna/Corregimiento
1	POPULAR
2	SANTA CRUZ
3	MANRIQUE
4	ARANJUEZ
5	CASTILLA
6	DOCE DE OCTUBRE
7	ROBLEDO
8	VILLA HERMOSA
9	BUENOS AIRES
10	LA CANDELARIA
11	LAURELES ESTADIO
12	LA AMERICA
13	SAN JAVIER
14	POBLADO
15	GUAYABAL
16	BELEN
50	PALMITAS
60	SAN CRISTOBAL
70	ALTAVISTA
80	SANTA ANTONIO DE PRADO
90	SANTA ELENA

**Figura 1.** División político-administrativa de la ciudad de Medellín

Nota. Fuente elaboración propia

#### 4.1 Inundaciones por precipitaciones extremas en la ciudad de Medellín

El riesgo de inundaciones en la ciudad de Medellín ha dejado un historial de víctimas y daños materiales significativo a lo largo de los años (DAGR, 2022). Este riesgo se ve agravado por una serie de factores, como cambios en la cobertura vegetal, una gestión deficiente de los recursos hídricos y del suelo, y debilidades institucionales (Sedano-Cruz et al., n.d.). Además, debido a la complejidad geomorfológica y a la variabilidad climática e hidrometeorológica natural de la región Andina y del departamento de Antioquia, se enfrentan grandes desafíos en términos de planificación, gestión de recursos y manejo de riesgos. (Alcaldía de Medellín, 2022).

La ciudad ha experimentado una serie de eventos de inundación extrema en los últimos años, y uno de los más recordados ocurrió el 14 de enero de 2022. Día en el que después de fuertes lluvias, se produjo una inundación en el depresión de los Músicos, también conocido como depresión de los Conquistadores, en la comuna 11 de Laureles, que resultó en la pérdida de dos

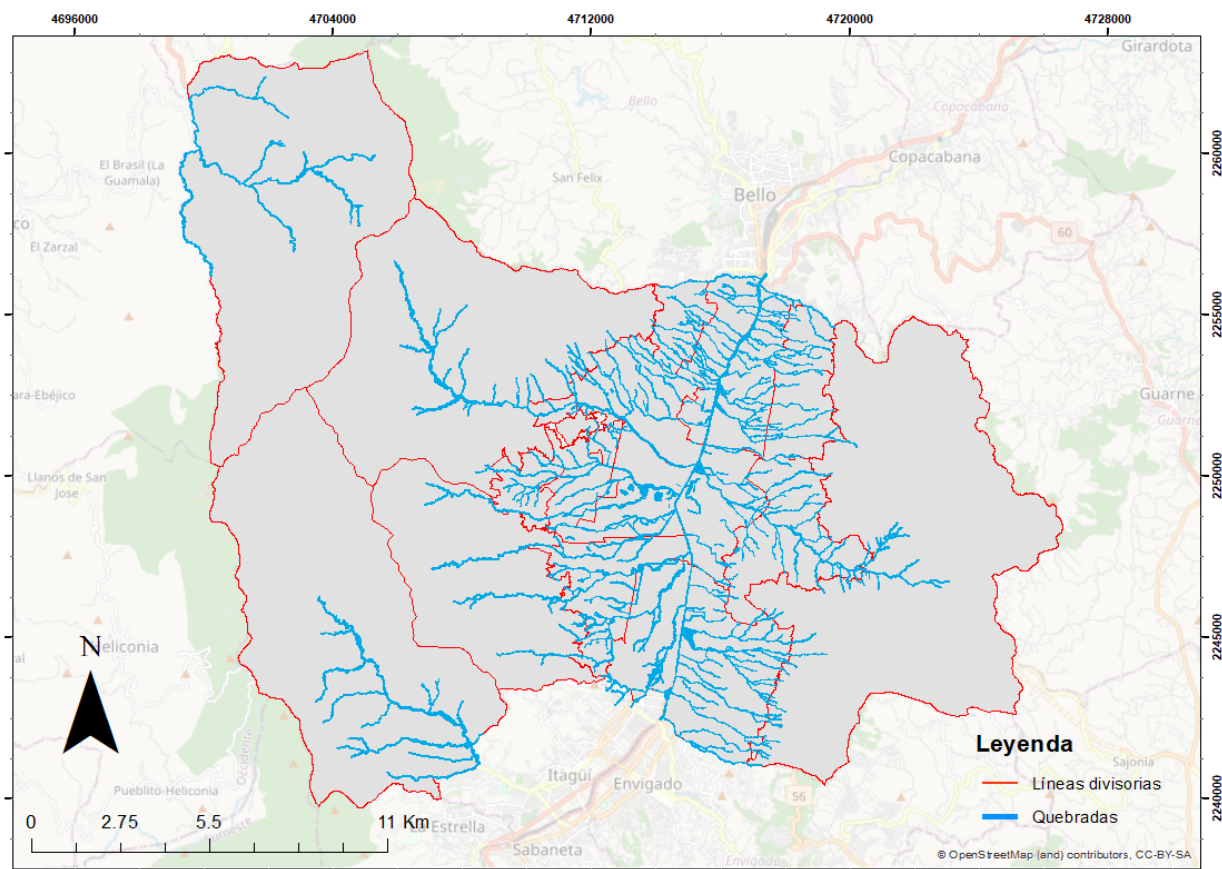
vidas, de igual forma en otros sectores de la ciudad en donde se presentaron los mayores acumulados de lluvia con vientos huracanados, se dio la caída de parte de los alumbrados, dejando adicionalmente 10 personas heridas (El Colombiano, 2023).

También es recordado el evento del 5 de abril de 2021, día en que la ciudadanía observó cómo el río Medellín crecía y se desbordaba en áreas como La Macarena y la calle 33, ambas ubicadas en la comuna de Laureles. Además, el soterrado de Parques del Río quedó inundado y diez vehículos quedaron atrapados. En esta ocasión, el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo (DAGR) informó sobre desbordamientos, cierres de vías, caída de árboles y recibió cerca de 200 llamadas de personas en situaciones de emergencia. (Piedrahita Tamayo, 2023). El 6 de mayo del mismo año, en la comuna 14 de El Poblado, debido a las intensas lluvias, se reportaron más de 30 desplomes de árboles, 25 casos de inundaciones, cinco deslizamientos y un alto flujo de lodo. Además, en el corregimiento de Santa Elena se registró una granizada. (Castellanos, 2021). Para cerrar el año, se tiene registro del 20 de noviembre, día en que una avenida torrencial arrastró un carro de comidas rápidas por una calle de la comuna 3 de Manrique, y hay reportes de estragos en el Centro, en Moravia y Aranjuez, comuna 4 (El Colombiano, 2022)

Estos incidentes son frecuentes y, según expertos, su origen y posible aumento tiene que ver con la deforestación, la urbanización y la falta de planificación territorial en la ciudad (Piedrahita Tamayo, 2023), así como con el impacto del cambio climático, que ha intensificado la duración del fenómeno de La Niña y en consecuencia ha generado un incremento en el nivel de precipitaciones (IPCC, 2021), lo que ha provocado desbordamientos y estragos causados por el río Medellín (Piedrahita Tamayo, 2023) que es la cuenca hidrográfica principal que cruza la ciudad. Además, el problema se agrava debido a las 4.217 quebradas aproximadamente, que están ubicadas en las diferentes comunas y corregimientos, de las cuales alrededor de 708 presentan niveles de amenaza por inundación que van desde muy bajo hasta alto (Morán, 2023); (Subdirección de Planeación Territorial y Estratégica de Ciudad, 2024). Estas se pueden apreciar en la

Figura 2. Esta situación, junto con la ya conocida desigualdad social, incrementa la vulnerabilidad de ciertas zonas ante tales eventos (Alcaldía de Medellín, 2022), lo que hace evidente el desarrollo de estrategias para la prevención y adaptación antes, durante y después de dichos sucesos.

**Figura 2.** Mapa de amenazas por inundación en la ciudad de Medellín



Nota. Fuente elaboración propia

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 Recolección de datos

En el proceso de desarrollo de un índice de vulnerabilidad socioeconómico, es fundamental destacar la importancia de realizar encuestas para obtener datos precisos y relevantes (De la Rosa Olivas & Montoya Reyes, 2023); (Cadena-Vargas, 2021), siempre y cuando se cuente con los recursos y medios para hacerlo. Estas encuestas se llevan a cabo en el lugar de estudio y permiten recopilar información detallada que luego se utiliza para personalizar el índice de acuerdo con las características específicas de cada comunidad (Spielman & Folch, 2015). Además, ayudan a identificar los factores clave que contribuyen a la vulnerabilidad y fomentan la participación de la comunidad en la toma de decisiones, lo que a su vez promueve una mejor comprensión y gestión de la vulnerabilidad (Hollin et al., 2016), así como el fortalecimiento de la resiliencia en las comunidades afectadas (Jose et al., 2017). Igualmente, es importante trabajar con datos proporcionados por el gobierno local, como censos, informes y reportes, que ofrecen información adicional para complementar los resultados de las encuestas y un mayor entendimiento de la vulnerabilidad social del lugar (David S. Rickless Xiaobai A. Yao & Welch-Devine, 2020).

En el caso específico del desarrollo de este índice para la ciudad de Medellín, se han utilizado datos recopilados a través de encuestas administradas por la Alcaldía, como la encuesta de calidad de vida para el año 2022. También se revisaron los datos nacionales obtenidos del último censo. Adicionalmente, se ha aprovechado la información proporcionada por diversas entidades, como el proyecto de ciencia y tecnología del área Metropolitana SIATA y diferentes informes y reportes del área de salud y seguridad entregados por la administración local, con el fin de enriquecer el análisis y mejorar la comprensión de la vulnerabilidad socioeconómica en la región.

#### 5.1.1 Datos censo nacional

El último censo nacional de población y vivienda realizado en Colombia es del año 2018 y fue ejecutado por el departamento administrativo nacional de estadística (DANE) que es la entidad responsable de *“la planeación, levantamiento, procesamiento, análisis y difusión de las estadísticas oficiales de Colombia”* (DANE, 2019), el censo recopila y describe a los habitantes, viviendas y hogares de Colombia, proporcionando información de primera mano sobre la cantidad de residentes, su distribución geográfica y sus condiciones de vida. Este estudio reúne los resultados agrupándolos en tres grandes componentes, *“¿Cuántos somos?”*, *“¿Dónde estamos?”*

y “¿Cómo vivimos?”, resaltando en cada uno de ellos información importante respecto al sexo, cantidad de personas, indicadores demográficos, tipo de vivienda, ubicación geográfica, etnia, ingresos, entre otros factores cruciales a la hora de medir la calidad de vida del país (DANE, 2018). No obstante, los resultados obtenidos de este censo se presentan a nivel municipal, departamental y nacional, lo que limita su utilidad para caracterizar áreas más específicas como comunas, corregimientos o barrios. La teoría sugiere que es recomendable calcular el índice de vulnerabilidad a esta escala más localizada (Medina et al., 2020), pues esto ayuda a identificar con mayor facilidad áreas con vulnerabilidad alta, moderada o baja (Hollin et al., 2016) y zonas de mayor riesgo (Nelson et al., 2015), evita evaluaciones erróneas y mejora la formulación del índice (García et al., 2019), además, también facilita que los responsables de tomar decisiones dirijan sus recursos de manera más eficaz, lo que puede tener un impacto más significativo en la reducción del riesgo de desastres (Medina et al., 2020).

Por este motivo se busca información a nivel municipal, encontrando en la misma base de datos del DANE la encuesta nacional de calidad de vida, esta es llevada a cabo con la finalidad de obtener información que permita examinar y contrastar las condiciones socioeconómicas de los hogares que residen en el país, lo que facilita el seguimiento de variables relevantes para el diseño e implementación de políticas públicas (DANE, 2023); esta también se encuentra a escala general nacional, pero luego de una búsqueda en las bases de datos de la administración local se identifica este mismo modelo a escala de comunas y corregimientos para la ciudad de Medellín.

### **5.1.2 Encuesta calidad de vida**

Esta encuesta, llevada a cabo por la alcaldía de Medellín, permite monitorear y evaluar las condiciones socioeconómicas de los residentes en las 16 comunas y 5 corregimientos que componen el municipio. Se enfoca en garantizar la representatividad tanto a nivel general de Medellín como en la desagregación territorial mencionada. A través de ella, se pueden obtener datos e indicadores sobre diversos temas, como población, vivienda, salud, educación, seguridad social y percepción ciudadana, entre otros (Alcaldía de Medellín, 2023).

La encuesta se encuentra en formato Excel y la información recopilada está categorizada con una serie de códigos que representa cada una de las 313 preguntas que componen el reporte, así mismo, las respuestas obtenidas están designadas por números, por lo que es necesario revisar el diccionario de la encuesta que también está disponible en formato Excel donde se definen las



preguntas por código y se da un valor textual o numérico a cada respuesta, dependiendo del tipo de contestación esperada según la pregunta. Dicho informe es el reporte base para la generación del índice para la ciudad de Medellín.

### 5.1.2.1 Cálculo de mínimo encuestados

Es de relevancia mencionar que antes de iniciar con el análisis de datos de la ECV 2022, se realizó con ayuda de una calculadora online conocida como “CheckMarket” By Medallia, el cálculo de mínimo encuestados para obtener resultados con un valor estadísticamente significativo. A continuación, se comparten los resultados obtenidos luego del cálculo para cada una de las comunas y corregimientos con el margen de error seleccionado en cada caso.

**Tabla 2.** *Cálculo mínimo de encuestados*

Código	Nombre	Población encuestada	% Población encuestada	Margen de error	Nivel de confianza	Mínimos encuestados
1	POPULAR	1648	0,012	0,03	0,95	1060
2	SANTA CRUZ	1228	0,011	0,03	0,95	1058
3	MANRIQUE	1949	0,012	0,03	0,95	1061
4	ARANJUEZ	1729	0,012	0,03	0,95	1060
5	CASTILLA	1379	0,011	0,03	0,95	1059
6	DOCE DE OCTUBRE	2000	0,011	0,03	0,95	1061
7	ROBLEDO	2122	0,011	0,03	0,95	1062
8	VILLA HERMOSA	1758	0,011	0,03	0,95	1060
9	BUENOS AIRES	1651	0,010	0,03	0,95	1061
10	LA CANDELARIA	894	0,012	0,04	0,95	596
11	LAURELES ESTADIO	1041	0,010	0,04	0,95	597
12	LA AMERICA	877	0,010	0,04	0,95	597
13	SAN JAVIER	1644	0,010	0,03	0,95	1061
14	POBLADO	1041	0,010	0,04	0,95	597
15	GUAYABAL	682	0,010	0,04	0,95	595
16	BELEN	2134	0,010	0,03	0,95	1062
50	PALMITAS	90	0,016	0,05	0,95	360
60	SAN CRISTOBAL	1497	0,012	0,03	0,95	1058
70	ALTAVISTA	487	0,012	0,05	0,95	381
80	SANTA ANTONIO DE PRADO	1218	0,012	0,03	0,95	1056
90	SANTA ELENA	348	0,014	0,05	0,95	379

*Nota. Los valores para el margen de error y el nivel de confianza son dados por la misma calculadora y solo fueron variados de acuerdo con la necesidad de cada caso particular.*

Se observa resultado en rosa que no se cumple con el mínimo de encuestados únicamente para los corregimientos de San Sebastián de las Palmitas y Santa Elena, no obstante, el caso de San Sebastián es mucho más evidente, puesto que la diferencia entre el mínimo de encuestados y el total de encuestados es bastante extremo, sin embargo, se decide trabajar con los datos de la encuesta pues cumple con el mínimo requerido para la mayoría de comunas y corregimientos y por falta de información en la red sobre esta zona en específico.

### **5.1.3 Datos adicionales**

Durante la investigación, se nota que no todos los factores y variables del modelo del índice creado cuentan con datos disponibles, si se limita la búsqueda únicamente a los informes del censo y la encuesta de calidad de vida de la ciudad de Medellín. Esto ha generado la necesidad de buscar información en otras fuentes, como el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA). Este proyecto de ciencia y tecnología del Área Metropolitana se erige como una estrategia regional para la gestión de riesgos y el monitoreo de las condiciones ambientales del territorio. Su principal meta es robustecer la toma de decisiones fundamentada en información precisa y facilitar la intervención oportuna de los organismos de respuesta. De este modo, se garantiza el acceso en tiempo real a datos relevantes sobre la probabilidad de eventos extremos que puedan impactar la calidad de vida de los habitantes metropolitanos (SIATA, 2010). Los datos entregados por esta entidad se encuentran en formato pdf y Excel, algunos de carácter abierto y otros que deben solicitarse a través del portal que tienen destinado para ello.

También se aprovechan distintos informes emitidos por la administración local, especialmente en el ámbito de seguridad. Uno de estos informes es el Reporte de Seguridad y Convivencia, desarrollado por Medellín Cómo Vamos. Esta alianza interinstitucional privada se enfoca principalmente en evaluar y dar seguimiento a la calidad de vida en la ciudad. A través de informes especializados, realiza un seguimiento de la situación de grupos poblacionales como la primera infancia, los jóvenes y las mujeres del área metropolitana. Asimismo, se encarga de elaborar informes específicos sobre seguridad y violencia en la ciudad (Medellín Cómo Vamos, 2016). De manera similar, para el ámbito de la salud, se utiliza el Informe de Indicadores Básicos 2018, que recopila información de las unidades prestadoras de servicios de salud en la ciudad de

Medellín (Alcaldía de Medellín, 2018). Estos informes se encuentran en formato pdf y son de acceso libre. Finalmente, también se tendrá en cuenta información tomada de las páginas oficiales de la administración local encontrada en la red.

## **5.2 Índice de vulnerabilidad**

### **5.2.1 Metodología de selección de artículos de interés**

Para el desarrollo del índice ICESCO, se realizó en primer lugar una selección cuidadosa de artículos, informes y documentos relevantes. Dado que el estudio se enfoca en una investigación de carácter exploratorio, esta etapa inicial se centró en recopilar información pertinente para fundamentar adecuadamente el análisis. La búsqueda se llevó a cabo utilizando las bases de datos proporcionadas por la Universidad de Antioquia, específicamente a través del catálogo de recursos de información digitales y electrónicos. Se centró en el buscador Scopus, donde se empleó una ecuación específica que incluía palabras clave relevantes como "índice", "vulnerabilidad socioeconómica" e "inundación". Luego, se realizó un meticuloso proceso de selección y descarte para trabajar con aproximadamente 100 artículos que podrían ser relevantes para la referencia, redacción y desarrollo del índice.

### **5.2.2 Desarrollo del índice de vulnerabilidad**

El índice ICESCO se fundamenta en un modelo jerárquico compuesto por tres componentes principales: susceptibilidad, falta de capacidad de resistencia y falta de capacidad de adaptación. Esta estructura se respalda en investigaciones anteriores que utilizaron una metodología similar. Por ejemplo, Medina et al. (2020) emplearon los mismos tres componentes, denominados susceptibilidad, falta de capacidades de afrontamiento y falta de capacidades de adaptación. Asimismo, Hoque et al. (2019) los identificaron como vulnerabilidad física, vulnerabilidad social y capacidad de afrontamiento.

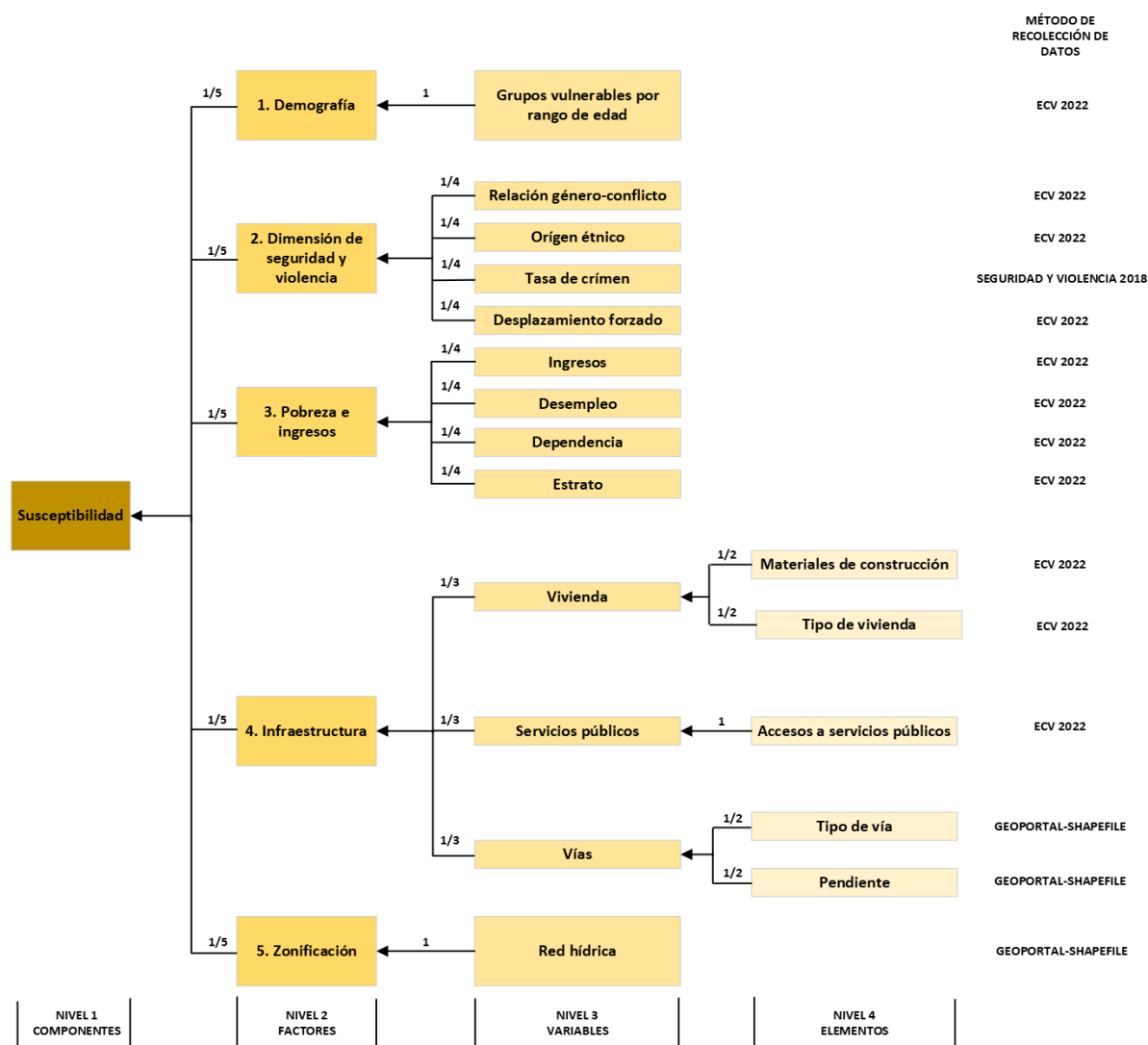
De estos tres componentes principales se desprenden una serie de factores, variables y elementos, los cuales son seleccionados considerando el acceso a la información y el comportamiento socioeconómico específico de cada comuna y corregimiento. Es importante destacar que, para algunos de estos factores, variables y elementos, no fue posible obtener información, por lo que serán presentados como parte de un índice "ideal" pero que no pudo ser desarrollado debido a la falta de datos disponibles. A continuación, se detalla el proceso para la medición de cada uno de los componentes principales, junto con la evaluación final de

vulnerabilidad, proporcionando una explicación detallada para la implementación de cada uno de ellos.

### 5.2.2.1 Susceptibilidad

La susceptibilidad hace referencia a los elementos expuestos dentro del sistema y su probabilidad de sufrir daños ante un evento de inundación extrema (UNESCO-IHE, n.d.), los factores responsables de esta susceptibilidad pueden variar según las condiciones locales, por lo que es necesario analizarlos y seleccionarlos cuidadosamente (Anees et al., 2020).

**Figura 3.** Esquema componente de susceptibilidad



*Nota.* La conceptualización del modelo esquemático se basó en el trabajo titulado “Assesing socioeconomic vulnerablity after a hurricane: A combined use of an index-based approach and principal components analysis” de (Medina et al., 2020).

El factor de **demografía** se elaboró utilizando exclusivamente la información proporcionada en la encuesta de calidad de vida del año 2022, centrándose únicamente en la variable de "grupos vulnerables por rango de edad". Es común que este tipo de variable se utilice en muchos estudios revisados (Deepak et al., 2020); (Khajehei et al., 2020); (D. M. E. Haque et al., 2020); (Mansur et al., 2016) ya que se refiere a grupos de personas con un alto grado de dependencia de otros, como los niños menores de 5 años y los adultos mayores de 65 años. Estos grupos, debido a su edad y a sus limitaciones físicas y/o cognitivas, enfrentan dificultades significativas durante eventos de inundaciones extremas.

El factor de **seguridad y violencia** se incorpora en el índice principalmente debido a la historia de violencia en la ciudad, una historia que ha dejado su marca no solo en Medellín, sino en todo el país. Sin embargo, en Medellín, esta historia se manifestó de manera particular en un conflicto urbano que impactó directamente en algunas comunas y corregimientos de la ciudad, como señala (Martin, 2019). Este autor menciona que, en Medellín, muchas personas abandonaron los barrios de Manrique y Aranjuez, comuna 3 y 4 respectivamente, en las décadas de 1980 y 1990, hartas de la inseguridad generada por las bandas y la criminalidad en un contexto de impunidad y otras deficiencias institucionales.

Este factor se divide en cuatro importantes variables, que son consecuencia directa de esta narrativa. La primera de ella es la relación de género-conflicto, con esta se busca explicar la diferencia entre hombres y mujeres a la hora de enfrentar el conflicto armado, puesto que se puede observar que son los hombres quienes tienen más tendencia a perder la vida en este tipo de acontecimientos, mientras que la mujer por lo general sufre de otro tipo de victimización. Tal criterio lo respalda la oficina de las Naciones Unidas para la Prevención de Crisis y la Recuperación, quienes afirman que luego de ver esta relación a través de la historia de conflicto en el mundo, se destaca que son los hombres quienes generalmente toman el rol combativo en estos eventos, y en consecuencia quienes más pierden la vida, mientras que la mujer se cataloga como víctima (García, 2022); así mismo lo señala Banwell (2020) en su reporte, enfatizando que

no se debe minimizar el papel de la mujer en medio del conflicto, puesto que esta sufre generalmente, otros tipos de violencia de un grado igual o mayor a la sufrida por el hombre.

La segunda variable se refiere al origen étnico, la cual engloba múltiples factores que sugieren una mayor susceptibilidad para las personas pertenecientes a minorías étnicas. Por ejemplo, según Roncancio et al. (2020) es probable que las diferencias étnicas impongan barreras culturales y lingüísticas que podrían afectar el acceso a los esfuerzos de prevención y adaptación en caso de inundaciones. Además, en el país se reconoce la disparidad en el acceso a oportunidades para las minorías étnicas. Por ejemplo, según Agudelo-Suarez et al. (2016) los grupos étnicos minoritarios en Colombia experimentan menos acceso a servicios de salud, lo que resalta la necesidad de intervenciones políticas para mitigar las desigualdades en salud, un aspecto crucial en la respuesta ante eventos de inundación extrema. Por último, Tate et al., (2021) señala en sus conclusiones que las minorías raciales tienden a estar sobrerrepresentadas en áreas críticas, lo que sugiere que posiblemente habiten en zonas susceptibles, ya sea por limitación de recursos o por elección propia. Para el cálculo de esta variable, se hace uso de la información recopilada por la ECV 2022, donde se tienen en cuenta a las personas que se identifican así mismas, como pertenecientes a una minoría, categorizada como afrodescendiente, indígena o ROM; para el cálculo también se tuvo en cuenta la población que se identifica como mestiza.

Por otra parte, la tasa de crimen se tuvo en cuenta por la historia de conflicto armado en la ciudad. Doyle (2019) indica que, a pesar de una marcada disminución en los homicidios en Medellín, tanto la violencia real como la percibida siguen teniendo un impacto significativo en la vida de los habitantes de la ciudad. Por lo que se vuelve esencial comprender cómo se percibe esta, para determinar la susceptibilidad de las personas ante este aspecto. Para esta variable, se emplea el informe de seguridad y violencia correspondiente al año 2018, el cual se contrasta con el número total de personas reportadas por comuna.

Finalmente, para concluir con el análisis del factor de seguridad y violencia, es relevante mencionar la variable de desplazamiento forzado. El desplazamiento forzado engloba una variedad de consecuencias que deben ser consideradas, una de ellas es que por lo general obliga a que las personas que sufren de este flagelo se ubiquen en las zonas más pobres y con mayor criminalidad de las grandes ciudades (Desmond & Shollenberger, 2015), afectando la capacidad de

recuperación de las comunidades afectadas (Mucherera & Spiegel, 2022) a la hora de afrontar un evento de inundación extrema. Para este análisis se tuvo en cuenta los datos de la ECV 2022.

El siguiente factor es el de **pobreza e ingresos**, éste a su vez se subdivide en 4 variables, que son ingresos, desempleo, dependencia y estrato. La variable de ingresos es usada normalmente a la hora de analizar la vulnerabilidad socioeconómica de una comunidad, como lo señalan De Silva y Kawasaki (2018) y A. N. Haque (2021), para su medición es común pensar en usar los ingresos recibidos por las personas que habitan en una casa, sumarlos y promediar, luego de restar los gastos por hogar. Sin embargo, esta forma de cálculo se ha visto altamente cuestionada al pasar de los años porque es un dato que necesita de tiempo y recursos para la realización de encuestas. Adicionalmente, es común que no se tengan en cuenta los ingresos generados fuera de cualquier tipo de contratación legal, como los generados por los empleados transitorios o independientes o la comercialización de pequeños cultivos. Por esta razón, se ha venido implementando una nueva forma de medir los ingresos de un hogar que es recomendable principalmente para países de ingresos bajos y medianos. En este caso en lugar de centrarse en los ingresos o gastos, se recopilan datos sobre variables que reflejan los niveles de vida. Esto incluye la propiedad de activos duraderos, como televisores o automóviles, así como las características de infraestructura y vivienda, como la fuente de agua y las instalaciones sanitarias en los hogares (Vyas & Kumaranayake). Para el cálculo de esta variable se usan los datos de la ECV 2022.

En cuanto al desempleo, se deduce que altos niveles de desempleo, trae como consecuencias principales bajos ingresos, pobreza, bajos niveles de educación y esto impacta directamente en el nivel de dependencia de las personas (Mudavanhu et al., 2020). Esta variable se mide usando la ECV 2022.

La variable de dependencia indica la proporción entre la población que no está en edad laboral, como los menores de 15 años y los mayores de 65 años, y la población en edad de trabajar, que oscila entre los 15 y 65 años. Valores más altos en este parámetro sugieren una mayor presión sobre la población en edad de trabajar para mantener a sus dependientes (Medina et al., 2020). Se podría deducir entonces que un incremento en la proporción de la población en edad de trabajar y una disminución en las tasas de dependencia infantil en países de bajos ingresos como el nuestro, pueden estimular el crecimiento económico y mitigar la pobreza (Cruz & Ahmed, 2018). Los datos para su cálculo se recopilan de ECV 2022.

El estrato socioeconómico, puede revelar disparidades significativas entre diferentes áreas como lo señalan (Chakraborty et al., 2020); (Malakar & Mishra, 2017); (Mello Rezende, 2016) en sus informes, esto a su vez puede ser un indicador de mayor susceptibilidad de una comunidad, a la hora de atravesar por una inundación extrema peligrosa. Nuevamente la información es sacada de la ECV 2022.

El factor de **infraestructura** se basa en la información de la ECV 2022. La primera variable para tener en cuenta es la vivienda, que a su vez se divide en dos elementos, materiales de construcción y el tipo de vivienda. Varios estudios han investigado la susceptibilidad de distintos materiales de construcción ante diversos riesgos. Balasbaneh et al. (2020), por ejemplo, encontraron que las paredes de madera son especialmente susceptibles a los daños por inundaciones, pero más asequibles, a diferencia de las paredes de bloques de concreto y las estructuras prefabricadas de concreto, que son más resistentes, pero mucho más costosas. Algo similar ocurre con el tipo de vivienda, que se clasifica en alquilada o propia, lo que puede sugerir un impacto significativo en los ingresos de las personas encuestadas. Por otra parte, es importante destacar que los inquilinos suelen enfrentar una variedad más amplia de problemas de vivienda en comparación con los propietarios, lo que los coloca en una situación socioeconómica más vulnerable (Lee & Van Zandt, 2019).

La segunda variable de este factor se refiere al acceso a servicios públicos, como el suministro de agua potable, el alcantarillado y la recolección de residuos. La relevancia de esta variable radica en que el acceso a estos servicios está estrechamente relacionado con un mayor riesgo de enfermedades en las áreas donde el saneamiento es inadecuado. En tales lugares, los habitantes están expuestos directa o indirectamente a la contaminación del agua y del medio ambiente, lo que se ve agravado por la pobreza y las deficiencias en la gobernanza (Parry et al., 2018). Toda la información para la computación fue sacada de la ECV 2022.

Finalmente, el papel de las vías radica en su capacidad para mejorar o empeorar las condiciones durante una evacuación potencial. Por esta razón, se considera el tipo de vías, siendo las primarias y secundarias generalmente de mejor acceso que las terciarias. Sin embargo, durante una evacuación, esta dinámica puede invertirse, ya que las vías primarias suelen congestionarse debido al aumento del tráfico generado por la emergencia, aumentando el riesgo (N. Chen et al., 2019). Además, la pendiente de las vías es un factor relevante, ya que la susceptibilidad de los



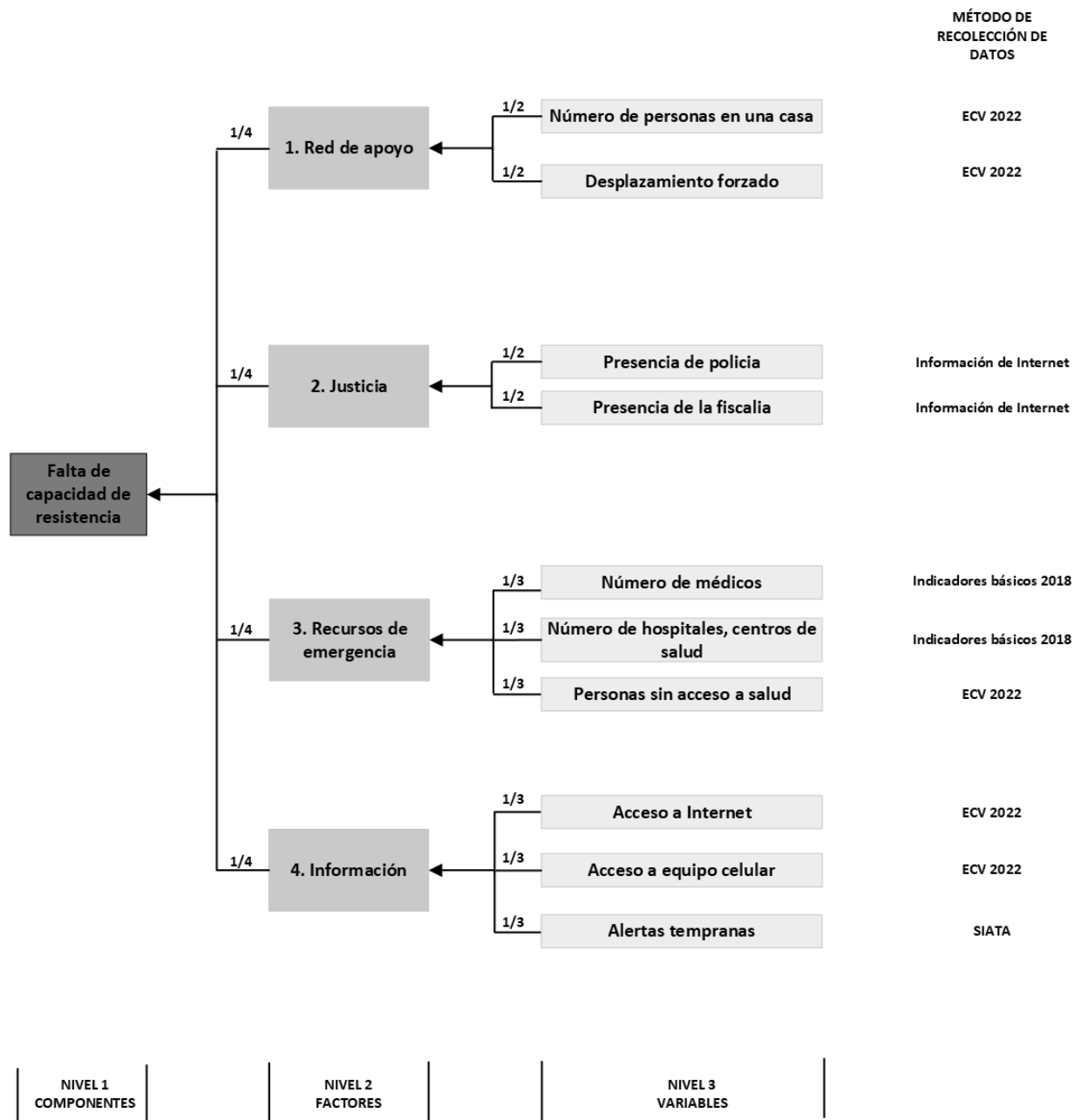
camino aumenta en áreas con pendientes pronunciadas debido a problemas de drenaje deficientes o inexistentes (Medina et al., 2020). Para el cálculo de esta variable y elementos se usa la información de acceso libre que se encuentra en el geoportal de la gobernación de Antioquia en formato shapefile, estos datos fueron analizados posteriormente en el programa GIS (ArcMap 10.8.1) y Excel.

Por último, se considera el factor de **zonificación**, cuyos datos, al igual que en el factor anterior, fueron obtenidos del geoportal de la Gobernación de Antioquia en formato shapefile. Estos datos fueron posteriormente analizados utilizando el programa GIS (ArcMap 10.8.1) y Excel. La variable de la red hídrica se refiere a las quebradas que, según la información recopilada, representan algún nivel de amenaza categorizado como alto, medio, bajo y muy bajo. Estas quebradas están ubicadas en cada una de las comunas y corregimientos, lo que puede indicar el grado de susceptibilidad ante una inundación de una zona en específico.

#### **5.2.2.2 Falta de capacidad de resistencia**

Este componente también es llamado como falta de capacidad de afrontamiento y está relacionado con la falta de capacidades y recursos que tiene una comunidad para afrontar y soportar un evento peligroso (Medina et al., 2020); (UNESCO-IHE, n.d.), en este caso de inundación extrema. Para este componente se consideraron 4 factores, red de apoyo, justicia, recursos de emergencia e información.

**Figura 4.** Esquema componente de falta de capacidad de resistencia



*Nota.* La conceptualización del modelo esquemático se basó en el trabajo titulado “Assesing socioeconomic vulnerability after a hurricane: A combined use of an index-based approach and principal components analysis” de (Medina et al., 2020).

La **red de apoyo** está soportada en dos variables, en el número de personas de una casa y en el desplazamiento forzado. El número de personas de una casa es una pieza común en los índices de vulnerabilidad socioeconómica (Senan et al., 2023); (Medina et al., 2020). Apuntando que a mayor cantidad de personas viviendo en una misma casa, será mayor la red de ayuda que se tendrá en un momento de emergencia, señalando que serán más vulnerables quienes vivan solos (Medina et al., 2020). El desplazamiento forzado también presenta una dinámica similar, ya que las personas obligadas a abandonar su lugar de origen y trasladarse a ciudades grandes, por lo general, carecen de una red de apoyo debido a que no conocen a nadie en su nuevo entorno. Estas variables son evaluadas con la información que se obtiene en la ECV 2022.

Para evaluar el factor de **justicia**, se considera la presencia policial y de la fiscalía en cada comuna y corregimiento. Estos datos se recopilan desde la página oficial de la alcaldía de Medellín y se analizan utilizando Excel. Se puede inferir que en las áreas donde no hay presencia de estas instituciones, la vulnerabilidad aumenta, especialmente durante situaciones críticas de seguridad y amenazas de tipo ambiental, ya que no se cuenta con la asistencia de las entidades mencionadas (DNP, 2015).

Dentro del análisis de **recursos de emergencia**, se evaluaron tres variables. El número de médicos hace alusión al número de profesionales que hay por comuna para atender la población total del área, el número de centros de salud y hospitales por comuna y la cantidad de personas sin acceso al servicio de salud. Los 3 indicadores mencionados están relacionados con el servicio de salud y su accesibilidad, aspecto vital a la hora de atender un acontecimiento de emergencia, que representa una disminución directa en la vulnerabilidad (Garbutt et al., 2015). Además de aumentar significativamente la resiliencia de una comunidad (Dong et al., 2020). La información para el cálculo de este factor fue sacada del informe de indicadores básicos 2018, generado por la alcaldía de Medellín y computado posteriormente en Excel.

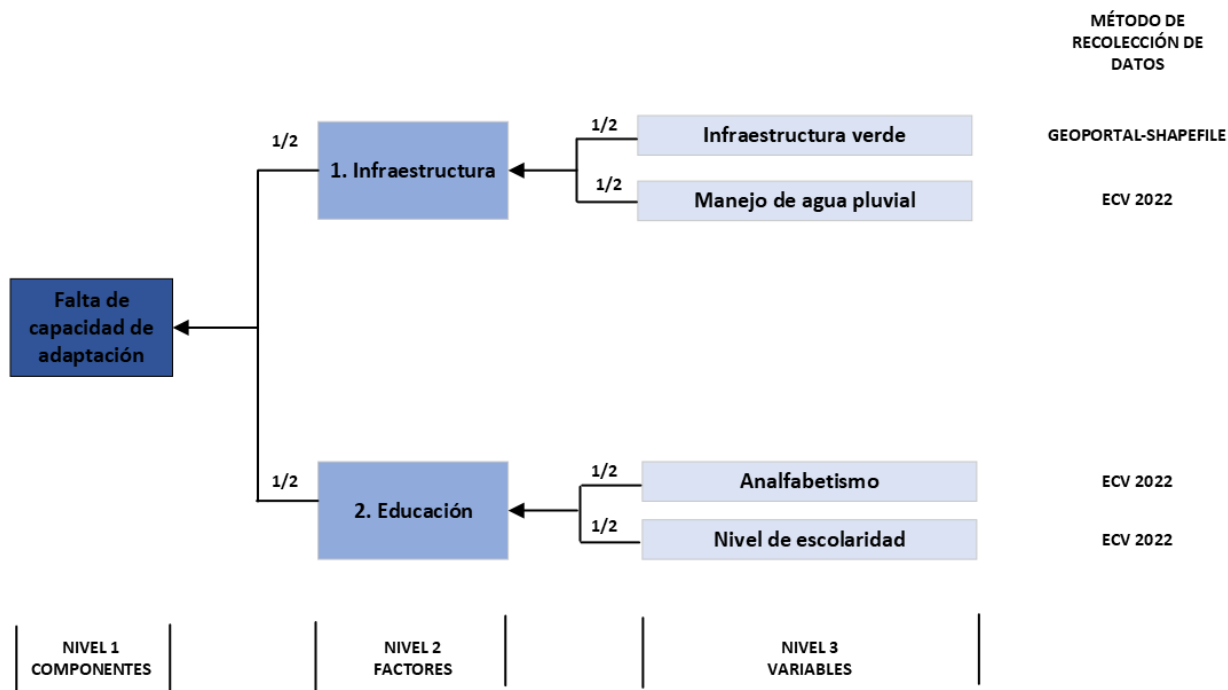
El cuarto y último factor de este componente es la **información**, el acceso a internet, el acceso a un equipo celular y el sistema de alertas tempranas están relacionados con la posibilidad de acceder a mensajes, noticias y alertas que puedan ser comunicadas a la comunidad antes, durante y después de una emergencia, favoreciendo el proceso de una posible evacuación y contribuyendo con la localización efectiva de las víctimas afectadas, asegurando una respuesta

rápida y eficiente (Kolios et al., 2020), adicionalmente, contar con un sistema de alertas tempranas ayuda a la detección de inundaciones, que puede mejorar significativamente la gestión de desastres al proporcionar detección y evaluación de riesgos casi en tiempo real (Van Ackere et al., 2019). Para las dos primeras variables se hace uso de los datos de la ECV 2022 y para el sistema de alertas tempranas se realiza una búsqueda de información en el portal del SIATA, que posteriormente se organiza y evalúa en Excel.

### 5.2.2.3 Falta de capacidad de adaptación

La adaptación está relacionada con la capacidad de recuperación que tiene una comunidad después de un evento peligroso (Medina et al., 2020), las estrategias de adaptación pueden mitigar la vulnerabilidad socioeconómica ante una emergencia, al reconocer los obstáculos y recursos disponibles, y al enfocarse en acciones adaptativas amoldadas a las particularidades de cada comunidad. (Metcalf et al., 2015).

**Figura 5.** Esquema componente de Adaptación



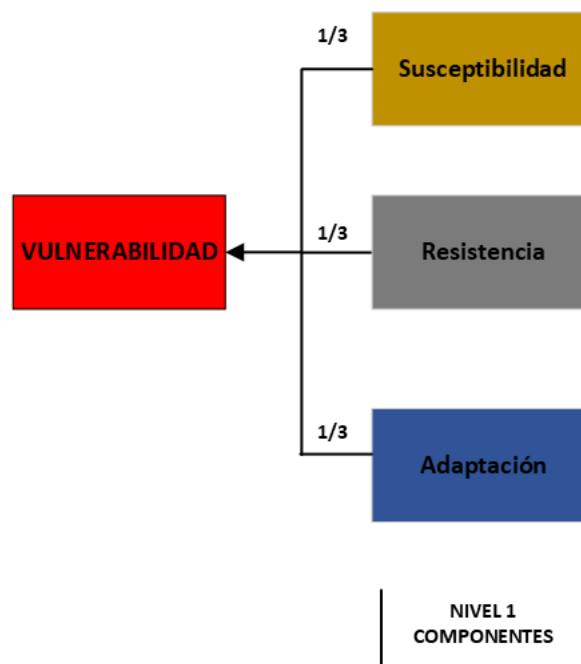
*Nota.* La conceptualización del modelo esquemático se basó en el trabajo titulado “Assesing socioeconomic vulnerability after a hurricane: A combined use of an index-based approach and principal components analysis” de (Medina et al., 2020).

Para el componente en cuestión, se evaluaron dos factores, infraestructura y educación. En **infraestructura** se tuvo en cuenta la infraestructura verde disponible para cada una de las comunas y corregimientos de la ciudad, la información para esta variable se obtuvo del geoportal de la Gobernación de Antioquia en formato shapefile. Estos datos fueron posteriormente analizados utilizando el programa GIS (ArcMap 10.8.1) y Excel. Es crucial considerar que la creación de infraestructura resiliente constituye uno de los principales retos para las ciudades, dado el aumento constante de las tasas de urbanización, que resulta en una mayor impermeabilización del suelo y, por ende, un incremento en la escorrentía y el riesgo de inundaciones. Estos eventos se ven agravados por el fenómeno del cambio climático (López-Valencia, 2019). Por otro lado, el manejo del agua pluvial tiene que ver con la instalación adecuada y el acceso al servicio de drenaje o alcantarillado que ayuda con la reducción de la escorrentía y por ende mitiga las inundaciones, para este último se trabaja con los datos de la ECV 2022.

El segundo factor es el de **educación**, donde se tiene en cuenta el nivel de escolaridad y el analfabetismo. Esto tiene que ver con el hecho de que una mayor educación se asocia con una menor vulnerabilidad socioeconómica (Lu, 2018). Esto indica una mayor capacidad para adaptarse y volver a la normalidad luego de un acontecimiento crítico como una inundación extrema. Para estas variables se computa la información de la encuesta de calidad de vida 2022 para la ciudad de Medellín.

#### **5.2.2.4 Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad será calculada como la suma de los componentes principales elegidos: susceptibilidad, resistencia y adaptación otorgándoles a cada uno de ellos un peso de  $1/3$ , con la finalidad de que la suma final sea igual a 1. Adicionalmente, se espera obtener como resultado el porcentaje de vulnerabilidad para cada una de las comunas y corregimientos de la ciudad de Medellín. Es importante aclarar que para el cálculo de la vulnerabilidad fue necesario normalizar cada uno de los factores y variables para llevarlos a una escala común, que para este caso es el rango que va de 0 a 100.

**Figura 6.** *Esquema de Vulnerabilidad*

*Nota.* La conceptualización del modelo esquemático se basó en el trabajo titulado “Assesing socioeconomic vulnerablity after a hurricane: A combined use of an index-based approach and principal components analysis” de (Medina et al., 2020).

### 5.3 Mapeo

Para representar cartográficamente cada uno de los componentes y la vulnerabilidad general de la ciudad de Medellín, se utiliza el software GIS (ArcMap 10.8.1). Inicialmente, se carga el archivo shapefile que contiene la delimitación de las comunas y corregimientos, utilizando el sistema de coordenadas CTM12. Una vez cargado, se vinculan las tablas de resultados correspondientes a cada uno de los tres componentes y a la vulnerabilidad total.

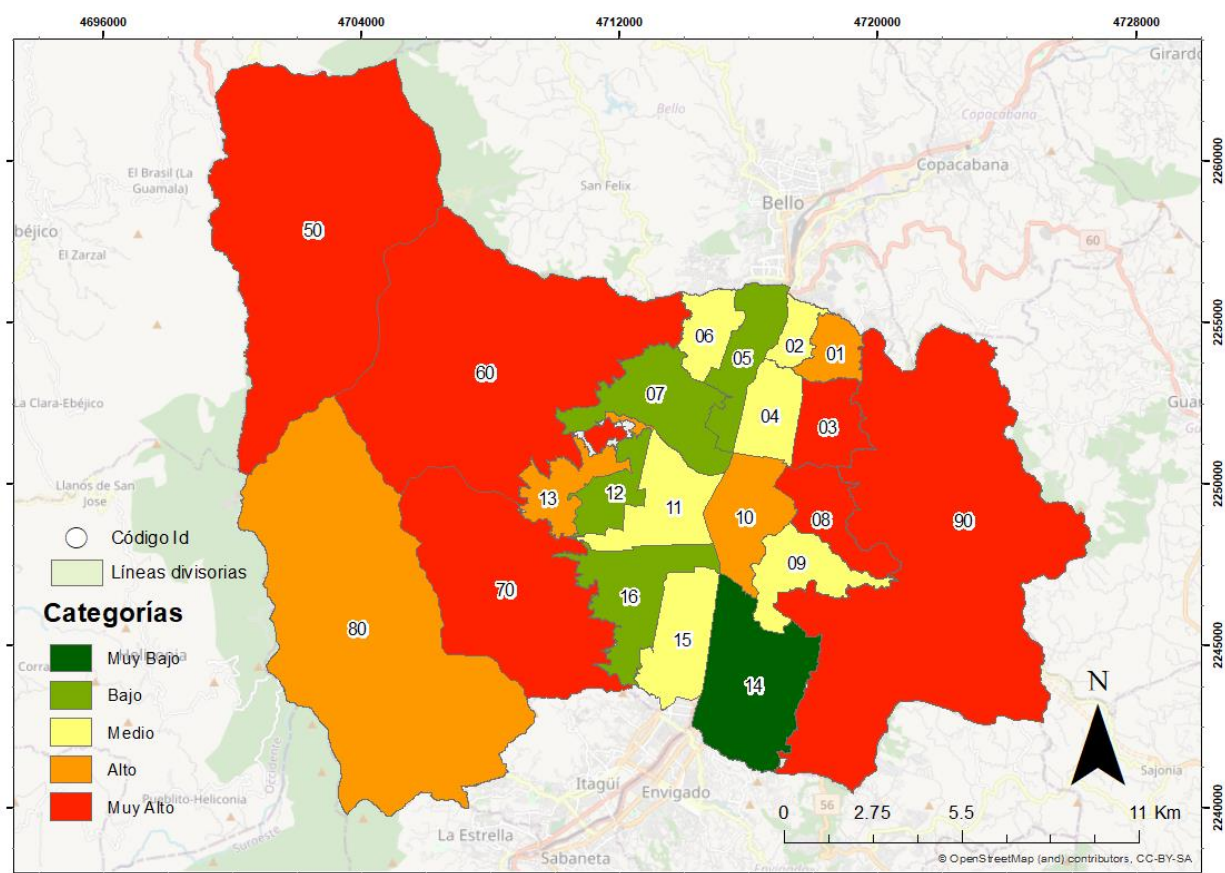
Posteriormente, se procede a categorizar los datos utilizando el método de "natural breaks", que permite dividir la información en 5 intervalos: Muy alto, Alto, Medio, Bajo y Muy bajo. Este método se elige porque identifica agrupaciones inherentes a los datos, lo que facilita la definición de las clases. Además, permite identificar puntos de quiebre entre las clases, lo que agrupa de manera más efectiva valores similares y maximiza las diferencias entre las clases. Finalmente, los mapas se exportan en formato de imagen y se adjuntan al trabajo.

## 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 6.1 Susceptibilidad

Para calcular el componente de susceptibilidad se evaluaron cinco factores: demografía, dimensión de seguridad y violencia, pobreza e ingresos, infraestructura, y zonificación de riesgo. A continuación, en la Figura 7 se presenta el mapa donde se muestra el valor calculado obtenido para el componente de susceptibilidad representado en 5 categorías, “Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto”, diferenciados por colores (verde oscuro, verde claro, amarillo, naranja y rojo respectivamente). Las comunas y corregimientos se encuentran señaladas por su código asignado, Tabla 1.003.

**Figura 7.** Mapa de susceptibilidad ciudad de Medellín



Nota. Fuente de elaboración propia

En términos de susceptibilidad, las zonas con valores más críticos en el municipio de Medellín corresponden a los corregimientos, donde observamos 4 de 5 de ellos, resaltados en rojo, siendo estos San Sebastián de las Palmitas, San Cristóbal, Altavista y Santa Elena, lo que indica un valor de susceptibilidad “Muy Alto”. En cuanto a las comunas, la comuna 3 (Manrique), y la comuna 8 (Villahermosa), son las que presentan el mayor valor. Para este componente el factor que más aumenta la susceptibilidad en todos los casos es la zonificación, con valores que oscilan entre el 23% y el 90%. Este factor en particular señala las quebradas con un riesgo de inundación muy bajo, bajo, medio o alto y para el caso de los corregimientos y comunas en rojo este está por encima del 72%. El segundo factor que más contribuye a la susceptibilidad es la dimensión de seguridad y violencia, esta influye notoriamente en el cálculo por lo que las personas que habitan en las zonas categorizadas en color naranja (San Antonio de Prado, Popular, La Candelaria y San Javier), perciben un mayor riesgo de inseguridad, con un porcentaje por encima del 35%, donde el valor más alto está en la comuna 10 (La Candelaria), llegando casi al 55%. Cabe resaltar que este valor es mucho mayor en comunas como Santa Cruz, Manrique, Aranjuez, Castilla, Doce de Octubre, Robledo, Laureles y Guayabal, pero al ser calculada la susceptibilidad total, estas no se encuentran en riesgo alto de inundación por el porcentaje de amenaza que está dado por la red hídrica, evaluado en la zonificación, se evidencia entonces que para estos casos el valor de este factor es mucho más bajo, motivo por el cual la susceptibilidad total disminuye.

En el rango medio, están las comunas de Santa Cruz, Aranjuez, Doce de Octubre, Buenos Aires, Laureles y Guayabal, tras revisar los porcentajes obtenidos para cada uno de los cuatro factores evaluados, evidencia similitudes entre sus valores, lo que explica el porqué de su cuantificación en esta categoría. No obstante, es importante destacar que se esperaría que la comuna de Laureles Estadio estuviera dentro de los rangos de bajo o muy bajo en términos de susceptibilidad. Para esta zona, el factor demográfico tiene un peso significativo, lo cual sugiere que es probable que la mayoría de las personas que residen allí tengan más de 65 años o menos de 5 años, lo que las pone en una posición más susceptible en comparación con otras comunas con una calidad de vida similar, como por ejemplo El Poblado. Esto podría explicarse, en la caracterización que realiza la alcaldía de Medellín por comuna, el último reporte encontrado es del 2020, y para el caso específico de la comuna 11 señalan que únicamente el 36,4% se encontraba en edades entre 29 y 54 años para ese entonces (Alcaldía de Medellín, 2020).



En el rango correspondiente a susceptibilidad Baja, están las comunas de Castilla, Robledo, la América y Belén, en este grupo se destacan varios aspectos; el primero de ellos es el hecho de que se encuentren allí las comunas de Castilla y Robledo, debido a que se esperaba que estas comunas presentasen una susceptibilidad un poco mayor, sin embargo, revisando los valores obtenidos para cada uno de los factores, se logra evidenciar que la zonificación tiene un valor mucho menor en comparación con el de las comunas ubicadas en las otras categorías, motivo por el cual a la hora de computar la susceptibilidad final, este valor de zonificación es compensado un poco con los demás factores, que están más altos con respecto a comunas como la América y Belén, en donde se espera que elementos como el de seguridad e ingresos estén más bajos, es decir en mejores condiciones de estos factores, en términos del componente de susceptibilidad.

En “Muy Bajo”, únicamente se encuentra la comuna 14, Poblado, esta comuna tiene el valor más bajo frente a la amenaza representada en la zonificación, además de contar con valores bajos de susceptibilidad en los factores ingresos y de infraestructura.

A continuación, se presenta la tabla 3 con el top de comunas y corregimientos con los valores más altos del componente de susceptibilidad, y el valor obtenido para cada factor con los que se calculó el componente.

**Tabla 3.** Top de comunas y corregimientos con rango de susceptibilidad "Muy alto"

Código ID	Nombre	Demografía	Seguridad y violencia	Pobreza e ingresos	Infraestructura	Zonificación	Susceptibilidad
60	SAN CRISTOBAL	17,57	45,00	31,73	32,50	79,03	41,17
90	SANTA ELENA	18,97	47,36	33,15	32,05	74,14	41,13
70	ALTAVISTA	16,63	52,39	29,16	29,79	72,73	40,14
50	PALMITAS	15,56	24,46	25,76	40,66	90,00	39,28
3	MANRIQUE	20,78	40,02	34,80	26,04	74,64	39,26
8	VILLAHERMOSA	20,88	40,90	34,59	22,77	75,95	39,02

Nota. Las comunas y corregimientos están ubicados en rango de mayor a menor en términos de susceptibilidad.

El corregimiento con el nivel de susceptibilidad más alto es el de San Cristóbal, quien presenta valores altos en los factores de zonificación, pero además cuenta con mayor deficiencia frente a la infraestructura, lo que indica que los materiales usados para construir en este sector no son los adecuados a la hora de afrontar un evento de inundación y además es probable que muchas

de las personas que allí habitan vivan en alquiler, lo que implica un impacto negativo en los ingresos.

También se resalta que, para el corregimiento de San Cristóbal, el valor del factor percepción de seguridad es relativamente alto con respecto a otros corregimientos y comunas, factor que también influye en el cálculo final. Para Santa Elena sucede algo similar, donde los tres factores que más contribuyen al componente son seguridad, infraestructura y zonificación.

En el caso de Altavista, se destaca que los factores de mayor influencia para que su susceptibilidad sea alta son la seguridad y la zonificación. Es importante mencionar que este corregimiento, junto con la comuna 10, son las zonas que presentan una percepción de seguridad más negativa (El Tiempo, 2023). Por otro lado, el corregimiento de Palmitas muestra un alto riesgo de inundaciones, con un 90% de amenaza derivada de su red hídrica, lo que lo categoriza como la zona más susceptible a inundaciones, adicionalmente, en niveles de infraestructura es el área con mayor deficiencia de los corregimientos y comunas con más alta susceptibilidad.

Para finalizar encontramos a las comunas de Manrique y Villahermosa, estas dos tienen los valores más altos de susceptibilidad relacionado con el factor demográfico del grupo analizado en los mayores valores de este componente, lo que señala una población aun en rangos productivos. En cuanto a términos de seguridad y violencia, pobreza e ingresos y zonificación, se tienen valores muy similares, lo que explica en parte el porqué de su posición en el grupo.

## 6.2 Resistencia

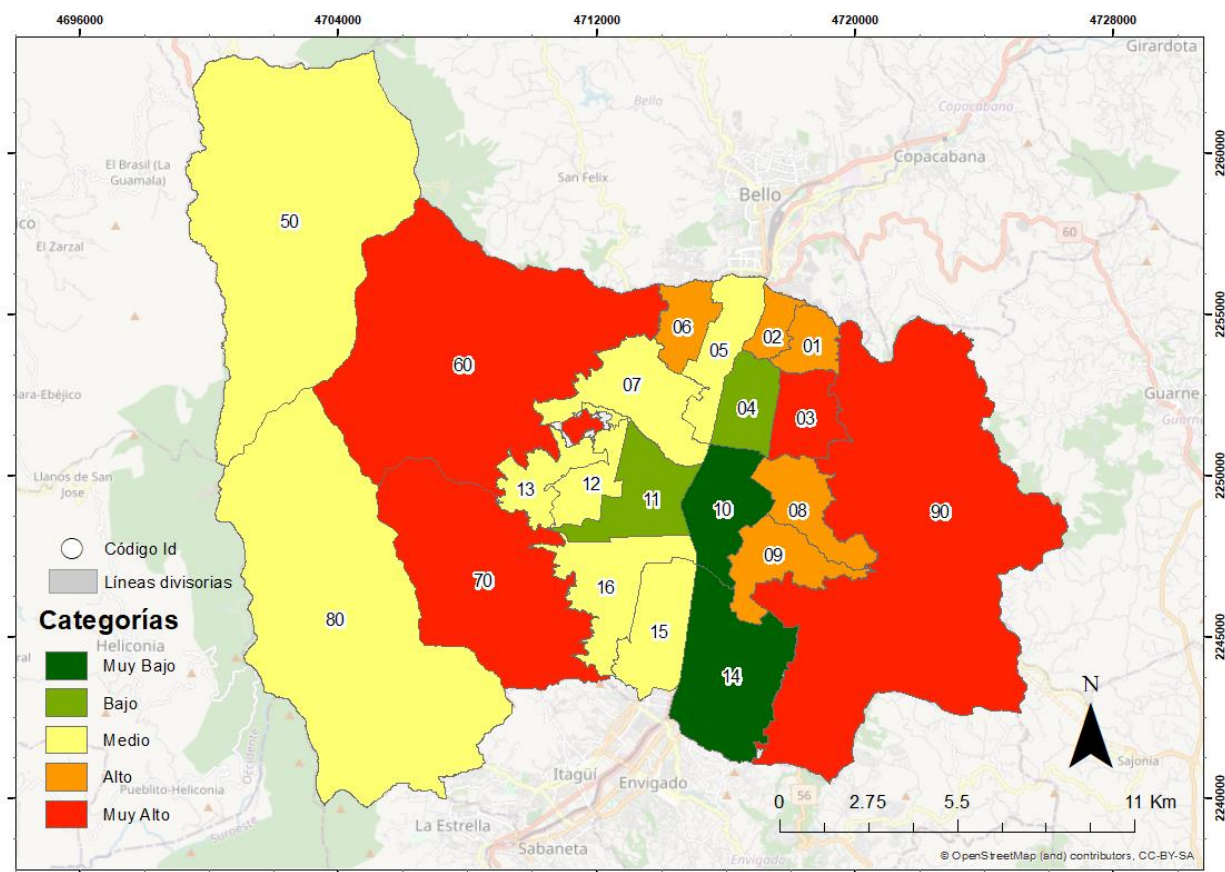
En el cálculo de resistencia se tuvieron en cuenta cuatro factores: red de apoyo, justicia, recursos de emergencia, e información. En la

Figura 8 se representan los valores evaluados en 5 categorías, “Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto”, diferenciados por colores (verde oscuro, verde claro, amarillo, naranja y rojo

Análisis de la vulnerabilidad socioeconómica ante la amenaza de inundaciones en ciudades latinoamericanas. Caso de estudio, Medellín, Colombia

respectivamente). Las comunas y corregimientos se encuentran señaladas por su código asignado, especificados en la Tabla 1.

**Figura 8.** Mapa de falta de capacidad de resistencia ciudad de Medellín



Nota. Fuente de elaboración propia

Para el componente de resistencia se observa que los factores de justicia y recursos de emergencia son las que más influyen en el cálculo de esta variable, evidenciando que en general hay falta de representación policial y de servicios de salud en la mayoría de las comunas y corregimientos que conforman el municipio de Medellín.

La categoría etiquetada como "Más alto" agrupa tres corregimientos y una comuna: San Cristóbal, Altavista, Santa Elena y Manrique, indicando que son áreas con menor capacidad de resistencia ante una emergencia por inundación. Como se mencionó anteriormente, en estos lugares hay escasa presencia policial y de la fiscalía, así como pocos profesionales médicos por comuna, también es común que más del 67% de la población carezca de acceso a servicios de salud, además de contar con pocas instituciones de salud disponibles. Por otra parte, es notable que Santa Elena y Manrique presenten los niveles más altos de falta de acceso a información, principalmente debido a la ausencia de sensores que permitan monitorear los niveles de las quebradas del área y emitir alertas tempranas. Esto dificulta que las personas accedan a los comunicados oficiales durante una posible emergencia. En cuanto a Altavista y San Cristóbal, la deficiencia se centra más en la red de apoyo, lo que se atribuye a una mayor cantidad de personas desplazadas según los datos revisados.

En el rango "alto", marcado en naranja, se encuentran las comunas del Popular, Santa Cruz, Doce de Octubre, Villahermosa y Buenos Aires. Una vez más, los factores más influyentes son la justicia y los recursos de emergencia, pero lo que marca la diferencia es la red de apoyo. Se evidencia un alto porcentaje de personas que indican ser desplazadas, lo que disminuye la capacidad de apoyarse mutuamente durante una inundación. En esta categoría también se observa la falta de sensores para medir los niveles de las quebradas durante las precipitaciones extremas, lo que aumenta la posibilidad de una crisis durante una emergencia no prevista.

En el nivel medio se encuentran la mayoría de las comunas y los dos corregimientos restantes: Castilla, Robledo, La América, San Javier, Guayabal, Belén, Palmitas y San Antonio de Prado. Los valores encontrados para la mayoría de los factores en este componente son cercanos entre sí, lo que puede explicar su agrupación en el mismo nivel. Sin embargo, la excepción es representada por el corregimiento de San Sebastián de las Palmitas. Dado que se cuenta con poca información para esta zona, es la única área con una red de apoyo por debajo del 6%, lo que traduce en que los habitantes de esta zona tienen mejor capacidad de resistir gracias a su red de apoyo, valor que en el cálculo es compensado con la falta de información relacionada con pocos sensores para generar alertas tempranas, razón por la cual se ubica en nivel medio.

Por último, en las categorías de "bajo" y "muy bajo", están las comunas faltantes, ubicando a Aranjuez y Laureles en bajo y a La Candelaria y el Poblado en muy bajo. Para el caso específico

de Aranjuez se observa que es la comuna con mayor cantidad de inspecciones de policía y además cuenta con presencia de la fiscalía; mientras que para Laureles el factor diferencial es que cuenta con la mayor cantidad de sensores para la generación de alertas tempranas, lo que implica un mejor acceso a la información. En cuanto a La Candelaria y El Poblado, ambos en el rango de muy bajo, se destaca que La Candelaria es la comuna con la mayor cantidad de lugares prestadores de servicios de salud, como hospitales y centros de salud, en la ciudad de Medellín. En consecuencia, la mayor cantidad de profesionales en salud también se encuentra allí. Por otro lado, El Poblado cuenta con una de las mejores redes de apoyo, ubicándose después del corregimiento de San Sebastián de las Palmitas. Además, es el sector con mayor cantidad de personas con acceso a servicios de salud, y es el segundo en la ciudad con la mayor cantidad de sensores en quebradas para la medición del nivel hidrográfico durante las precipitaciones.

En el top de este componente solo se ubican 3 corregimientos y una comuna, que están organizados de mayor a menor en la Tabla 4 en términos de resistencia.

**Tabla 4.** *Top de comunas y corregimientos con rango de resistencia "Muy alto"*

Código ID	Nombre	Red de apoyo	Justicia	Recursos de emergencia	Información	Resistencia
90	SANTA ELENA	47,99	87,50	95,20	52,09	70,69
70	ALTAVISTA	55,78	87,50	92,20	44,90	70,10
60	SAN CRISTOBAL	40,61	87,50	92,76	46,95	66,96
3	MANRIQUE	36,53	93,75	88,63	48,76	66,92

En la Tabla 4 se observa que el corregimiento con la peor capacidad de resistencia es Santa Elena, esto está relacionado directamente con el factor de recursos de emergencia y justicia, esto quiere decir que no se cuenta con el personal, ni con la infraestructura necesaria para atender la población total que allí habita, además de tener uno de los niveles más altos de personas sin acceso a salud, con porcentajes por encima del 89%. Por otra parte, es evidente que cuentan con un acceso bajo de información, pues no se tienen instalados la cantidad adecuada de sensores, si se compara con el número de quebradas que hay en el área y que representan un posible riesgo en caso de tener un evento con precipitaciones extremas que deriven en una posible emergencia por inundación.

Para el caso de Altavista se puede resaltar el factor de red de apoyo, pues gran parte de las personas que habitan en el sector indican ser víctimas del desplazamiento forzado, por lo que esto puede afectar a la hora de necesitar un grupo de ayuda en una posible situación extrema.

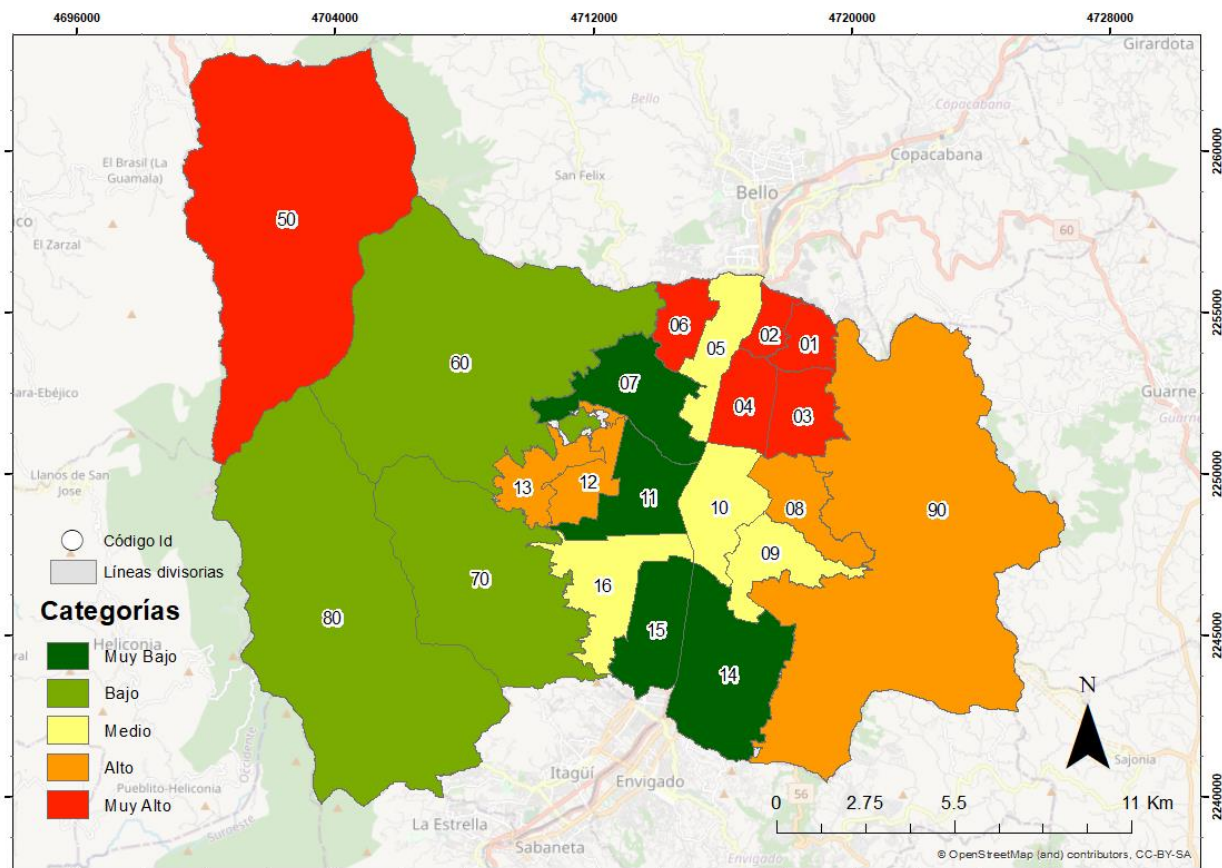
En San Cristóbal, los factores de red de apoyo y de información contribuyen en igual peso para el cálculo de la resistencia final, esto se explica en un alto porcentaje de personas desplazadas y una baja capacidad de medición de los niveles en las quebradas.

Finalmente, para Manrique la diferencia la hace el factor de justicia, en el cual la presencia de la policía y la fiscalía juega un rol importante y en este caso es demasiado bajo comparado con la cantidad de personas que habitan en esta área, por lo que en un momento de emergencia podrían presentarse problemas de orden público que agraven la situación, esto también puede traducirse en que se tiene menos ayuda por parte del gobierno en dicho sector.

### **6.3 Adaptación**

En el cálculo de adaptación únicamente se trabajaron con dos factores, infraestructura y educación. En la Figura 9 se representan los valores evaluados en 5 categorías, “Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto”, diferenciados por colores (verde oscuro, verde claro, amarillo, naranja y rojo respectivamente). Las comunas y corregimientos se encuentran señaladas por su código asignado, especificados en la Tabla 1.

**Figura 9.** *Mapa de falta de capacidad de adaptación ciudad de Medellín*



*Nota. Fuente elaboración propia*

En términos de adaptación, el corregimiento con menos capacidad es San Sebastián de las Palmitas, que presenta los niveles más bajos en temas de analfabetismo y nivel de escolaridad, esto puede afectar en caso de un evento extremo pues por lo general una mejor educación se relaciona con un mayor acceso a recursos que pueden ser usados para la adaptación post emergencia.

Además, es la zona que cuenta con el peor acceso al sistema de alcantarillado, con un porcentaje del 90% de habitantes sin acceso a este servicio. Esta situación puede generar dificultades para gestionar el drenaje de agua pluvial, lo que aumenta el riesgo de inundaciones. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este corregimiento no cuenta con el número mínimo requerido de encuestados, lo que puede afectar los resultados obtenidos. Igualmente, entre las comunas con menor capacidad de adaptación se encuentran Popular, Santa Cruz, Manrique, Aranjuez y el Doce de Octubre. Para estos, la infraestructura es el factor diferenciador, ya que son las áreas con menos metros cuadrados de zona verde por habitante, con una carencia que varía entre el 75% y el 100% de estos espacios, este fenómeno tiene un impacto directo en las comunas,

ya que durante precipitaciones extremas puede resultar en una mayor escorrentía debido a la falta de capacidad de infiltración. Esto se debe a que estas áreas están altamente urbanizadas, lo que conlleva a suelos más impermeabilizados.

El corregimiento de Santa Elena se sitúa en el nivel siguiente con una problemática similar a la de Sebastián de las Palmitas. Es el segundo sector con una mayor carencia de acceso al sistema de alcantarillado y, además, ocupa el segundo lugar en deficiencias en temas educativos. En cuanto a las comunas de Villahermosa, La América y San Javier, nuevamente es la infraestructura verde el factor predominante en el cálculo de adaptación, con porcentajes que indican una deficiencia del 50% en espacios de este tipo.

En el rango medio están las comunas de Castilla, Buenos Aires, La Candelaria y Belén, donde la falta de infraestructura verde es del 25% en todos los casos.

Para el nivel bajo los corregimientos faltantes de Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado aparecen con una cobertura alta de infraestructura verde, llegando a superar el nivel de metros cuadrados máximo por habitante, sin embargo, el valor de educación compensa el cálculo, posicionándolos antes del nivel con mayor capacidad de adaptación.

En el nivel más bajo se ubican las comunas de Robledo, Laureles Estadio, El Poblado y Guayabal. Para Robledo y Guayabal, el factor de infraestructura se sitúa en rangos similares, con una buena capacidad de infraestructura verde y de manejo pluvial. Por otro lado, Laureles y El Poblado presentan los valores más altos en temas educativos, lo que se relaciona con una mayor capacidad para adquirir recursos y adaptarse después de una emergencia.

A continuación, se relaciona en la Tabla 5 el top de comunidades con menos capacidad de adaptación y los valores obtenidos para cada uno de los factores evaluados, se encuentran organizados en orden del menos capacitado al más capacitado.

**Tabla 5.** *Top de comunas y corregimientos con rango de adaptación "Muy alto"*

Código ID	Nombre	Infraestructura	Educación	Adaptación
2	SANTA CRUZ	51,10	8,05	29,57
6	DOCE DE OCTUBRE	50,05	7,83	28,94
50	PALMITAS	45,00	12,27	28,63
3	MANRIQUE	40,99	9,72	25,35



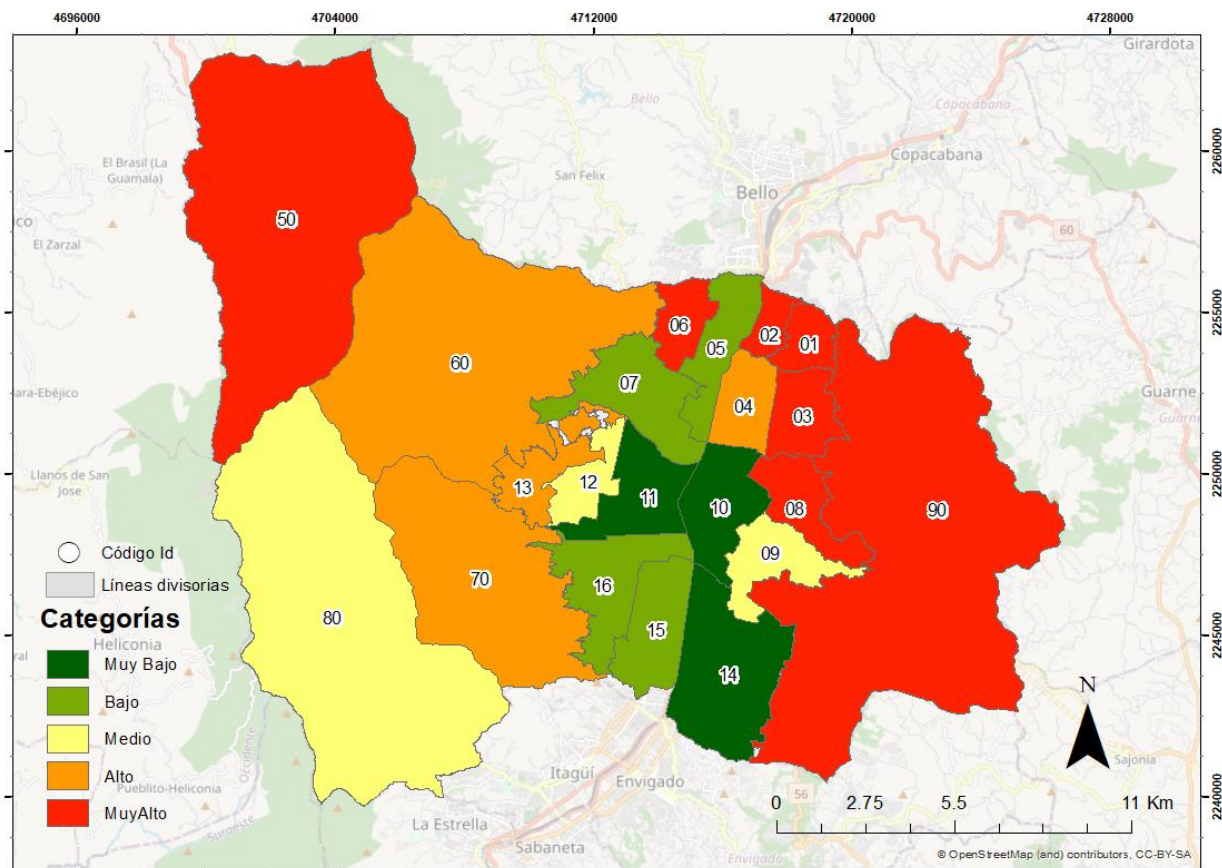
1	POPULAR	40,26	9,21	24,73
4	ARANJUEZ	42,47	6,23	24,35

Como se observa en la Tabla 5, la comuna con menos capacidad de adaptación es Santa Cruz, seguida del Doce de Octubre, el corregimiento de Palmitas y las comunas de Manrique, Popular y Aranjuez, el factor que más está influyendo en este componente es la infraestructura, que está relacionada con el acceso al servicio de alcantarillado y la presencia de infraestructura verde en la zona, esta última variable es la que está posicionando en primer lugar a la comuna de Santa Cruz. También se observa que la educación, aunque contribuye en menor cantidad con el resultado final también es un buen indicador de los niveles de adaptación, pues son estas 6 áreas, las que cuentan con una carencia más alta respecto a este tema.

#### **6.4 Vulnerabilidad**

El siguiente mapa muestra las comunas y corregimientos más vulnerables, luego de calcularla evaluando los componentes principales de susceptibilidad, resistencia y adaptación. Al igual que los mapas anteriores, el mapa de vulnerabilidad clasifica las comunas y corregimientos en 5 categorías, “Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto”, diferenciados por colores (verde oscuro, verde claro, amarillo, naranja y rojo respectivamente). Las comunas y corregimientos se encuentran señaladas por su código asignado, especificados en la Tabla 1.

#### **Figura 10. Mapa de vulnerabilidad ciudad de Medellín**

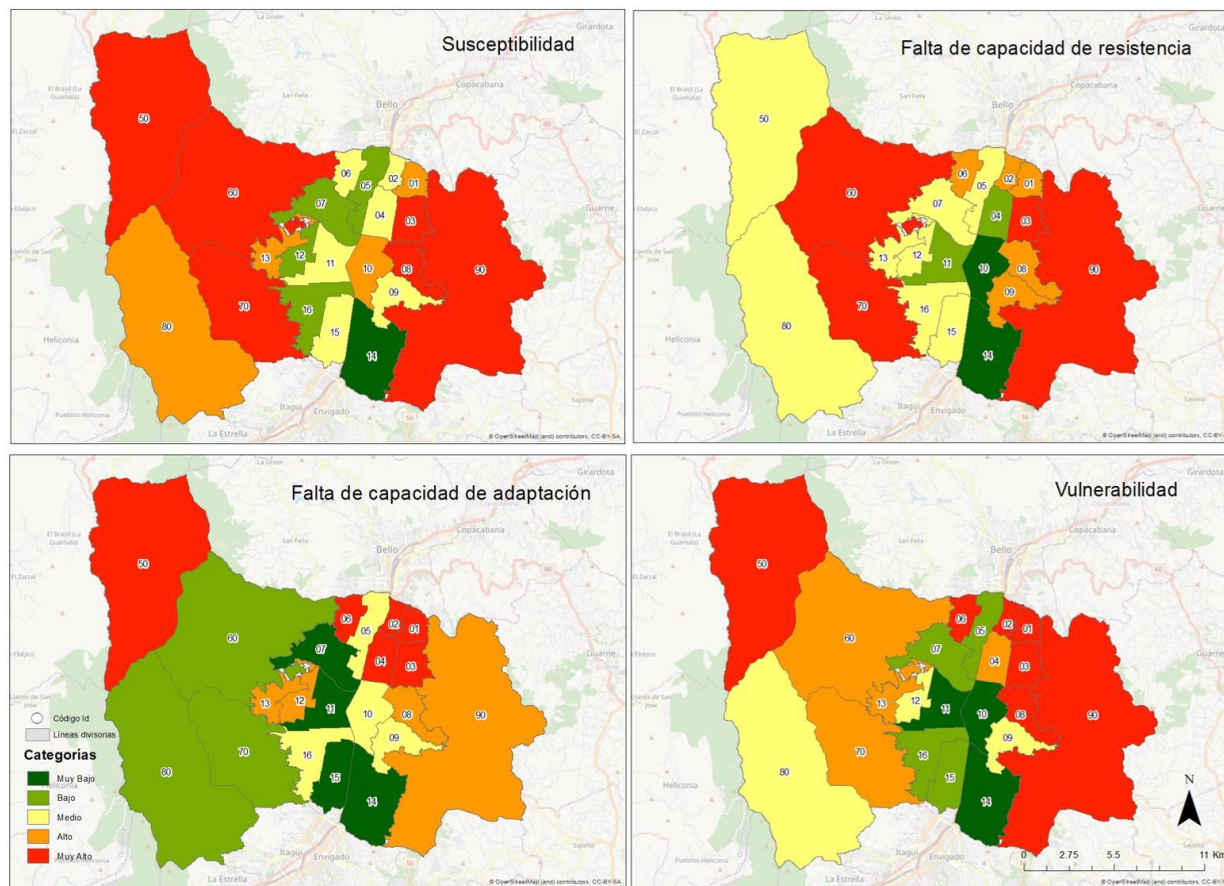


*Nota. Fuente elaboración propia*

En el mapa de vulnerabilidad que se observa, notamos bastantes zonas coloreadas en tonos rojos y naranjas, sin embargo, para su análisis se tendrá en cuenta la Figura 11, que es un cuadro comparativo de los tres componentes principales seleccionados (susceptibilidad, resistencia y adaptación), frente al resultado de vulnerabilidad final. El detalle de los valores obtenidos para los componentes principales en las zonas más vulnerables, estarán especificados en la Tabla 6.

**Figura 11.** Cuadro comparativo

Análisis de la vulnerabilidad socioeconómica ante la amenaza de inundaciones en ciudades latinoamericanas. Caso de estudio, Medellín, Colombia



Nota. Fuente de elaboración propia

En el mapa de vulnerabilidad, las áreas resaltadas en tono rojo indican el nivel de vulnerabilidad más alto. Estas áreas incluyen las comunas Popular, Santa Cruz, Manrique, Doce de Octubre y los corregimientos de San Sebastián de las Palmitas y Santa Elena.

Observando los datos presentados en el cuadro, es evidente que estas zonas generalmente muestran niveles que oscilan entre "Muy Alto" y "Alto" en dos o incluso en los tres componentes principales de vulnerabilidad. Por ejemplo, si se considera la comuna Popular: presenta niveles altos de susceptibilidad y resistencia, y un nivel muy alto en el componente de adaptación. Al sumar estos tres componentes, obtenemos un indicador de vulnerabilidad global, que en este caso es clasificado como "Muy Alto". Este patrón sugiere que estas áreas enfrentan desafíos significativos en términos de su capacidad para resistir y recuperarse de eventos adversos, así como en su capacidad para adaptarse a futuros riesgos, al ser más susceptibles. Algo similar ocurre con el corregimiento de Santa Elena, con la diferencia de que los valores más altos se encuentran en

los componentes de resistencia y susceptibilidad, mientras que la adaptación se encuentra en un grado menor. No obstante, al realizar el cálculo el resultado es el mismo, indicando que se debe buscar mejorar en las tres componentes por igual.

En el caso específico de la comuna dos de Santa Cruz, es notable que tanto los niveles de adaptación como de resistencia se encuentran dentro de los rangos más altos, lo que sugiere una capacidad baja para enfrentar y recuperarse de eventos adversos. Por otra parte, el valor de susceptibilidad se sitúa en un nivel medio. Este factor indica la predisposición de la comuna a sufrir impactos negativos ante eventos externos, como una posible emergencia por inundación. Por lo tanto, al calcular la vulnerabilidad total, que es la suma de estos tres componentes, se obtiene un valor alto. Esto sugiere que, la comuna dos de Santa Cruz aún enfrenta desafíos considerables en términos de su susceptibilidad, resistencia y adaptación a eventos adversos. Esta información destaca la importancia de implementar medidas adicionales para aumentar la capacidad de adaptación y resistencia y de trabajar para fortalecer aún más la susceptibilidad de la comunidad, con la finalidad de llevarla a un nivel bajo.

Es lógico esperar un valor alto en vulnerabilidad para la comuna de Manrique, ya que los tres componentes principales se sitúan en la categoría de mayor riesgo, indicada por el color rojo. Dado este escenario, es razonable suponer que Manrique sea incluso la comuna con la vulnerabilidad más alta dentro del área de estudio. La presencia de altos niveles de susceptibilidad, resistencia y adaptación en rojo sugiere que la comuna enfrenta múltiples desafíos en términos de su capacidad para resistir y recuperarse de eventos adversos, así como para adaptarse a futuros riesgos. Esta combinación de factores refuerza la necesidad de implementar medidas efectivas de mitigación y adaptación en Manrique para reducir su exposición a riesgos y fortalecer su capacidad de respuesta ante emergencias.

En el caso de la comuna del Doce de Octubre, se observa una dinámica diferente en comparación con otras áreas. La adaptación se encuentra en el nivel más alto (rojo), la resistencia está en un nivel inferior (naranja) y la susceptibilidad en un nivel medio (amarillo). Esta combinación de colores sugiere que, se tiene una capacidad baja para adaptarse a los riesgos, una baja capacidad de resistir y una susceptibilidad relativamente alta. Esta situación plantea un desafío significativo, ya que la susceptibilidad podría no ser suficiente para contrarrestar los efectos de una resistencia y adaptación posicionadas en los niveles alto y muy alto.

Para el corregimiento de San Sebastián de las Palmitas, tanto la adaptación como la susceptibilidad presentan valores extremos, lo que indica que la zona es muy susceptible y tiene dificultades para adaptarse. Por otro lado, la resistencia se encuentra en un valor medio. Al computar estos tres valores, se obtiene un rango alto de vulnerabilidad porque la combinación de una susceptibilidad alta y una capacidad de adaptación limitada, a pesar de una resistencia moderada, aumenta el riesgo general de la zona frente a eventos adversos.

En el nivel etiquetado con el color naranja, que identifica el rango alto de vulnerabilidad se encuentran las comunas de Aranjuez, San Javier y los corregimientos de San Cristóbal y Altavista.

Aranjuez presenta una baja capacidad para adaptarse, una buena capacidad para resistir y una susceptibilidad media. Sin embargo, al sumar los tres componentes, el resultado es una vulnerabilidad alta debido a la interacción de estos factores. A pesar de tener una capacidad relativamente sólida para resistir eventos adversos, la combinación de una capacidad de adaptación limitada y una susceptibilidad moderada aumenta el riesgo general de la zona ante posibles amenazas.

San Javier, por su parte, muestra una susceptibilidad relativamente alta, una capacidad de adaptación baja y una resistencia moderada. Sin embargo, al sumar estos componentes, el resultado es un nivel alto de vulnerabilidad. Esto se debe a que, a pesar de tener una resistencia moderada, la combinación de una susceptibilidad alta y una capacidad de adaptación baja el riesgo se ve aumentado significativamente.

Los corregimientos de Altavista y San Cristóbal en particular, presentan niveles muy altos de susceptibilidad y muy baja capacidad de resistencia, pero una alta capacidad de adaptación, esto se atribuye principalmente a las grandes áreas de infraestructura verde en estos sectores, no obstante, contar con este recurso no contrarresta el hecho de necesitar mejoras inmediatas para disminuir su susceptibilidad y aumentar su capacidad de resistencia.

Buenos Aires, La América y el corregimiento de San Antonio de Prado, están en un nivel intermedio de vulnerabilidad. En Buenos Aires, dos de los tres elementos se encuentran en un rango moderado, mientras que solo la resistencia está en un rango que indica una baja capacidad de resistir. En este caso, la adaptación y la susceptibilidad son los elementos que más influyen en

el resultado final de la vulnerabilidad, arrojando un valor medio. Esto implica que, aunque la zona puede tener cierta capacidad para resistir una inundación, su vulnerabilidad total está determinada principalmente por su capacidad de adaptación y su susceptibilidad.

La América a pesar de tener baja capacidad de adaptación, cuenta con una capacidad moderada de resistir y una baja susceptibilidad, estos dos factores son los que influyen en el resultado que se obtiene de vulnerabilidad. Algo similar ocurre con San Antonio de Prado, con la diferencia que al igual que en Altavista y San Cristóbal la adaptación aumenta por la infraestructura verde presente en la zona.

En los resultados, en la vulnerabilidad baja se identifican las comunas de Castilla, Robledo, Guayabal y Belén. En todos estos casos, se obtienen rangos similares en capacidad de resistencia, ubicándose en un nivel medio. Sin embargo, la capacidad de adaptarse varía entre los niveles medio, bajo y muy bajo, lo que indica una capacidad alta o media de adaptarse luego de un evento adverso. Este patrón se repite también en la susceptibilidad, lo que sugiere que estas zonas no presentan una exposición grave ante una amenaza de inundación. Por lo que se puede deducir, que, aunque estas comunas pueden enfrentar desafíos, su capacidad para resistir y adaptarse les otorga una vulnerabilidad baja frente a posibles eventos críticos.

Por último, las comunas de Laureles Estadio, El Poblado y la Candelaria son las zonas que presentan menos vulnerabilidad. Para el Poblado y Laureles era un resultado de esperarse puesto que en los tres componentes sus posiciones siempre ocuparon niveles de susceptibilidad media o muy baja y capacidades de resistencia y adaptación bastante altas a la hora de enfrentar posibles eventos críticos. Es decir que estos últimos dos factores son los que tienen más peso en el cálculo final de vulnerabilidad lo que tiene mucho sentido, pues son las zonas en las que se ubican los habitantes con mayor educación, lo que por lo general deriva en mayores ingresos y por ende con una calidad de vida mejor. El caso es diferente para la comuna 10 de la Candelaria, pues esta comuna presenta una susceptibilidad alta, factor que se ve aumentado por la percepción de seguridad de la zona y la zonificación de riesgos y su capacidad de adaptación es media, pero su resistencia es alta, puesto que la mayoría de lugares prestadores de servicios de salud y médicos se encuentran concentrado en este sector, esto quiere decir que este factor tiene una importancia alta a la hora de afrontar una inundación extrema, pues habla de la capacidad de responder eficientemente una vez se presenta un acontecimiento crítico.

A continuación, se presenta la información detallada de los valores que se obtuvieron para cada uno de los tres componentes en las comunas y corregimientos con una vulnerabilidad más alta, representada de mayor a menor.

**Tabla 6.** *Top de comunas y corregimientos con rango de vulnerabilidad "Muy alto"*

Código ID	Nombre	Susceptibilidad	Resistencia	Adaptación	Vulnerabilidad
3	MANRIQUE	39,26	66,92	25,35	43,84
90	SANTA ELENA	41,13	70,69	16,15	42,66
2	SANTA CRUZ	35,89	62,40	29,57	42,62
1	POPULAR	38,17	64,85	24,73	42,58
6	DOCE DE OCTUBRE	35,48	62,03	28,94	42,15
50	PALMITAS	39,28	58,37	28,63	42,10
8	VILLA HERMOSA	39,02	65,61	17,92	40,85

Como se puede apreciar en la tabla, el factor más influyente en el cálculo de la vulnerabilidad es la resistencia. Tal como se anticipaba al observar la Figura 11, la comuna 3 de Manrique ocupa la primera posición en términos de vulnerabilidad, ya que en los tres casos presenta valores cercanos a los más altos, lo que indica una mayor susceptibilidad y una menor capacidad de adaptación y resistencia. En el caso de Santa Elena, por su parte, se observa que la susceptibilidad desempeña un papel importante en la vulnerabilidad, esto como consecuencia de la zonificación de riesgo y la dimensión de seguridad y violencia, además de la resistencia. Por el contrario, en Santa Cruz, se destaca un valor alto en adaptación, que indica una baja capacidad de adaptarse, lo que puede ser resultado de la escasa infraestructura verde en el sector, lo que incrementa significativamente el riesgo.

Para la comuna 1, el factor influyente es la adaptación, atribuida a los niveles bajos en términos de educación, lo que contribuye directamente a la capacidad financiera de los habitantes. En el caso del Doce de Octubre, son la capacidad de resistir y la adaptación los elementos que aumentan la vulnerabilidad del sector. Esta situación se ve exacerbada por la falta de presencia policial y de la fiscalía en el sector, así como por el limitado acceso a médicos e instituciones prestadoras del servicio de salud.

El caso de San Sebastián de las Palmitas es particular, ya que es la zona con la cantidad más baja de información disponible, lo que puede afectar los resultados debido a la falta de

elementos estadísticos. Sin embargo, la zonificación de riesgo es uno de los factores que más influye en la susceptibilidad de la zona, ya que representa un grado de amenaza de inundación alto. Esta misma situación se presenta en Villahermosa, donde además se observan niveles bajos de resistencia. Esto se debe a que la zona carece de sensores para la generación de alertas tempranas, este tipo de acciones pueden marcar la diferencia en la capacidad de respuesta ante una posible inundación, motivo por el cual, se aumenta el valor del porcentaje en el factor de falta de información.

#### **6.4.1 Índice ideal**

Dentro del análisis realizado, se reconoce la existencia de numerosos factores adicionales que podrían integrarse en el índice propuesto para una caracterización más completa de las comunas y corregimientos de la ciudad de Medellín. Sin embargo, varios de estos elementos no pudieron ser considerados en el cálculo final de la vulnerabilidad y sus componentes debido a limitaciones en el acceso a la información. Por esta razón, en la



Tabla 7 se presenta un modelo de índice ideal que abarca una gama más amplia de características socioeconómicas, técnicas y ambientales, con el objetivo de lograr una caracterización más precisa y exhaustiva de la zona de estudio.

**Tabla 7. Índice ideal**

Componentes	Factores	Variables	Elementos	
Susceptibilidad	1. Demografía	1.1. Grupos vulnerables por rango de edad		
	2. Dimensión de seguridad y violencia		2.1. Género	
			2.2. Origen étnico	
			2.3. Tasa de crimen	
			2.4. Desplazamiento forzado	
	3. Pobreza e ingresos		3.1. Ingresos	
			3.2. Desempleo	
			3.3. Dependencia	
			3.4. Estrato	
	4. Vivienda			4.1.1. Materiales de construcción
		4.1. Estado de la vivienda	4.1.2. Tipo de vivienda	
			4.1.3. Número de pisos	
			4.1.4. Condición actual de la vivienda	
		4.2. Vías	4.2.1. Tipo de vía	
			4.2.2. Pendiente	
		4.3. Servicios públicos	4.3.1. Acceso a servicios públicos	
5. Zonificación		5.1. Red hídrica		
Resistencia	1. Red de apoyo	1.1. Número de personas en una casa		
		1.2. Desplazamiento forzado		
		1.3. Inmigración		
	2. Justicia	2.1. Presencia de la policía		
		2.2. Presencia de la fiscalía		
		2.3. Confianza en el gobierno		
	3. Recursos de emergencia	3.1. Número de médicos por comuna		
		3.2. Número de centros de salud y hospitales		
		3.3. Personas sin acceso a salud		
		3.4. Estaciones de bomberos		
4. Información	4.1. Acceso a red de Internet			
	4.2. Acceso a equipo celular			
	4.3. Sistema de alertas tempranas			
Adaptación	1. Infraestructura	1.1. Manejo de agua pluvial		
		1.2. Infraestructura verde		
	2. Educación	2.1. Nivel de escolaridad		
		2.2. Analfabetismo		
	3. Financiación	3.1. Presupuesto participativo		
		3.2. Acceso a créditos o paga diario		
		3.3. Ahorros		
	4. Estado ambiental		4.1. Calidad del aire	

Para el componente de susceptibilidad, se propone la inclusión de dos nuevos elementos relacionados con la vivienda: el número de pisos y la accesibilidad a múltiples niveles. Se reconoce la importancia de esta variable en el contexto de una inundación, ya que aquellos hogares que disponen de más de un piso tienen mayores posibilidades de resistir el aumento del nivel del agua al poder refugiarse en niveles superiores (Medina et al., 2020). Mientras que conocer la condición actual de la vivienda puede explicar la resistencia de una vivienda ante una inundación, una vivienda en mal estado o sin adecuadas medidas de construcción podría aumentar significativamente el riesgo de daños durante un evento de inundación (Proverbs & Lamond, 2017).

En el componente de resistencia se agrega la inmigración en el factor de red de apoyo, el motivo es que es común que los inmigrantes se enfrenten a desafíos adicionales debido a factores como la barrera del idioma, la falta de acceso a recursos y servicios, la discriminación y la falta de redes de apoyo social, además su percepción del riesgo puede ser diferente a la de los locales (Maldonado et al., 2016).

En justicia, también se adiciona la variable de confianza en el gobierno, en este caso la confianza en el gobierno facilita una comunicación abierta y transparente entre las autoridades y la población afectada. Esto es fundamental para proporcionar información precisa sobre la situación de emergencia, las medidas de seguridad y las acciones de respuesta en curso. Una comunicación clara y oportuna ayuda a reducir el pánico, disipa los rumores y permite que las personas tomen decisiones informadas para protegerse a sí mismas y a sus familias (Rainear & Lin, 2021).

Finalmente, incorporar la variable relacionada con las estaciones de bomberos al factor de recursos de emergencia es un paso significativo para mejorar la capacidad de respuesta ante riesgos de inundación extrema. La presencia de estaciones de bomberos en una zona afectada no solo proporciona un punto de apoyo vital durante una crisis, sino que también mejora la eficiencia y la efectividad de las operaciones de rescate y mitigación de desastres.

Incluir el factor de financiación en el componente de adaptación es crucial para comprender la capacidad de una comunidad para recuperarse después de un evento de inundación extrema. Este factor aborda la disponibilidad de recursos financieros y el acceso a diferentes formas de

financiamiento, lo que puede influir significativamente en la capacidad de adaptación de una población, pues se ha observado que los fenómenos meteorológicos extremos, como las inundaciones, agotan los activos de los hogares y los hacen vulnerables a las crisis y la pobreza (Afriyie et al., 2018).

Por último, la calidad del aire se relaciona con el hecho de que, al contar con una mejor calidad del aire, se puede contribuir a fortalecer la resiliencia comunitaria al reducir la carga de enfermedades relacionadas con la contaminación y mejorar la calidad de vida en general.

## 7 CONCLUSIONES

Mitigación de la susceptibilidad en zonas de alta vulnerabilidad y mejora sostenida en zonas con baja susceptibilidad: Es necesario priorizar acciones de mitigación en corregimientos como San Sebastián de las Palmitas, San Cristóbal, Altavista y Santa Elena, así como en las comunas 3 de Manrique y 8 de Villahermosa, que presentan valores elevados de susceptibilidad. Esto podría incluir medidas para fortalecer la infraestructura de gestión de riesgos, mejorar el acceso a servicios básicos y desarrollar estrategias de concientización y preparación comunitaria. En el caso de las comunas con menos niveles de susceptibilidad como Castilla, Robledo, la América, Belén y el Poblado, es importante mantener y fortalecer la capacidad de respuesta ante posibles amenazas. Esto podría incluir la promoción de prácticas de construcción segura y la capacitación en preparación para emergencias.

Estrategias y enfoques para mejorar la capacidad de resistencia en las comunidades: Para mejorar la capacidad de resistencia, es importante aumentar el acceso a los sistemas de alerta temprana, pues la falta de sensores para medir los niveles de las quebradas durante las precipitaciones extremas es un factor crítico que aumenta el riesgo de crisis durante una emergencia. Es necesario invertir en infraestructura de alerta temprana y sistemas de monitoreo que permitan una respuesta rápida y efectiva ante eventos climáticos extremos, como lo son las inundaciones. Además, se evidencia que conocer las características específicas de cada zona al diseñar estrategias de resistencia es útil a la hora de mitigar el problema. Por ejemplo, en áreas con alta densidad de población desplazada, es fundamental desarrollar programas de apoyo y atención especializada. Del mismo modo, en zonas con escasa información disponible, como en San Sebastián de las Palmitas se deben implementar medidas adicionales de precaución y monitoreo, basados en la información disponible y en la experiencia local histórica.

Es claro que se debe buscar la equidad en la aplicación de la ley, pues en muchos casos, las comunidades más vulnerables tienen menos acceso a recursos policiales y judiciales. Esto puede deberse a una variedad de factores, como la falta de financiamiento, la ubicación geográfica o la percepción de riesgo por parte de las autoridades. Medir la presencia de la fiscalía y la policía en áreas socioeconómicamente vulnerables puede ayudar a identificar disparidades en la aplicación de la ley y abogar por una distribución más equitativa de recursos. Por otra parte, la presencia policial y la efectividad de la fiscalía pueden influir en la prevención del crimen. Las comunidades

con una presencia policial más visible y una fiscalía más activa pueden tener tasas de criminalidad más bajas debido a la disuasión y la aplicación más efectiva de la ley. Medir la presencia de estas instituciones en áreas vulnerables puede ayudar a identificar brechas en la protección comunitaria y guiar políticas para mejorar la seguridad.

Por otra parte, hay una necesidad latente y urgente en la mejora de los servicios de salud, pues se nota una deficiencia alta en el acceso, infraestructura y cantidad de profesionales de servicios de salud en la mayoría de las comunas y corregimientos de la ciudad de Medellín. Esto incluye garantizar un acceso adecuado a servicios de salud, especialmente en momentos de emergencia.

Mejora del acceso a la educación y a los recursos para aumentar las condiciones en momentos de adaptación: La falta de educación y acceso a recursos en áreas como San Sebastián de las Palmitas, Popular, Santa Cruz, Manrique, Aranjuez y el Doce de Octubre afecta significativamente la capacidad de adaptación ante una inundación. Es fundamental implementar programas de educación y desarrollo que brinden a los residentes las habilidades y recursos necesarios para enfrentar y recuperarse de eventos extremos.

Además, es crucial conocer las diferencias entre áreas urbanas y rurales, pues las áreas urbanas tienden a tener suelos más impermeabilizados debido a la alta urbanización, lo que aumenta la escorrentía durante precipitaciones extremas. Por otro lado, las áreas rurales pueden enfrentar desafíos relacionados con el acceso a servicios básicos. Es importante diseñar estrategias de adaptación que tengan en cuenta estas diferencias y aborden las necesidades específicas de cada tipo de área.

Como conclusión general del trabajo, una estrategia integral para reducir la vulnerabilidad ante inundaciones en Medellín debe abordar una amplia gama de factores, desde los socioeconómicos y comunitarios hasta los ambientales y técnicos. Solo mediante un enfoque holístico y colaborativo se pueden desarrollar soluciones efectivas y sostenibles que protejan a la ciudad y a sus habitantes de los riesgos asociados con los eventos climáticos extremos.

**Anexo A.****Tabla 8. Susceptibilidad en factores**

Id	Nombre	Susceptibilidad				
		1. Componente demográfico	2. Dimensión seguridad y violencia	3. Pobreza e ingresos	4. Infraestructura	5. Zonificación
1	Popular	18,14	43,25	35,26	27,18	67,01
2	Santa Cruz	19,63	35,73	35,40	25,08	63,62
3	Manrique	20,78	40,02	34,80	26,04	74,64
4	Aranjuez	21,57	43,31	32,91	18,67	52,54
5	Castila	20,96	38,58	30,28	23,42	34,79
6	Doce de Octubre	21,25	36,92	33,91	18,73	66,58
7	Robledo	17,20	37,43	29,45	22,48	48,74
8	Villa Hermosa	20,88	40,90	34,59	22,77	75,95
9	Buenos Aires	19,44	33,62	29,68	25,31	67,54
10	La Candelaria	23,49	54,77	30,53	19,46	59,27
11	Laureles Estadio	29,78	35,23	22,53	14,78	62,89
12	La América	29,08	27,95	27,21	16,55	53,83
13	San Javier	20,62	35,59	33,18	15,47	79,53
14	Poblado	25,26	25,04	15,76	22,31	23,70
15	Guayabal	23,75	36,69	31,01	17,85	55,66
16	Belén	26,94	32,34	29,03	17,87	40,27
50	Palmitas	15,56	24,46	25,76	40,66	90,00
60	San Cristóbal	17,57	45,00	31,73	32,50	79,03
70	Altavista	16,63	52,39	29,16	29,79	72,73
80	San Antonio de Prado	17,65	34,14	31,23	27,58	77,35
90	Santa Elena	18,97	47,36	33,15	32,05	74,14

**Tabla 9. Falta de capacidad de resistencia en factores**

Id	Nombre	Falta de capacidad de resistencia			
		1. Red de apoyo	2. Justicia	3. Recursos de emergencia	4. Recursos de Información
1	Popular	38,57	87,50	87,90	45,41
2	Santa Cruz	28,24	87,50	88,14	45,73
3	Manrique	36,53	93,75	88,63	48,76
4	Aranjuez	35,20	37,50	87,85	49,66
5	Castila	28,95	93,75	90,63	28,71
6	Doce de Octubre	28,05	87,50	89,90	42,67
7	Robledo	27,38	75,00	90,51	38,94
8	Villa Hermosa	38,42	87,50	88,99	47,54

Análisis de la vulnerabilidad socioeconómica ante la amenaza de inundaciones en ciudades latinoamericanas. Caso de estudio, Medellín, Colombia

9	Buenos Aires	28,19	87,50	91,78	39,71
10	La Candelaria	19,99	62,50	34,47	37,08
11	Laureles Estadio	24,22	87,50	68,57	11,81
12	La América	16,85	93,75	91,75	32,87
13	San Javier	21,36	81,25	88,57	45,48
14	Poblado	13,76	81,25	38,21	31,17
15	Guayabal	18,52	93,75	90,81	36,37
16	Belén	22,89	81,25	87,57	35,95
50	Palmitas	5,19	87,50	91,91	48,89
60	San Cristóbal	40,61	87,50	92,76	46,95
70	Altavista	55,78	87,50	92,20	44,90
80	San Antonio de Prado	22,42	81,25	90,03	42,95
90	Santa Elena	47,99	87,50	95,20	52,09

**Tabla 10.** Falta de capacidad de adaptación en factores

Falta de capacidad de adaptación			
Id	Nombre	1. Infraestructura	2. Educación
1	Popular	40,26	9,21
2	Santa Cruz	51,10	8,05
3	Manrique	40,99	9,72
4	Aranjuez	42,47	6,23
5	Castila	12,65	4,72
6	Doce de Octubre	50,05	7,83
7	Robledo	0,99	4,70
8	Villa Hermosa	26,56	9,28
9	Buenos Aires	12,92	4,40
10	La Candelaria	12,50	3,95
11	Laureles Estadio	0,00	1,88
12	La América	25,00	4,89
13	San Javier	27,55	9,49
14	Poblado	0,14	0,98
15	Guayabal	0,22	4,91
16	Belén	12,69	5,21
50	Palmitas	45,00	12,27
60	San Cristóbal	5,28	7,36
70	Altavista	6,16	7,27
80	San Antonio de Prado	2,55	6,04
90	Santa Elena	22,13	10,17



**Tabla 11.** *Vulnerabilidad en componentes*

Vulnerabilidad					
Id	Nombre	1. Susceptibilidad	2. Resistencia	3. Adaptación	Vulnerabilidad
1	Popular	38,17	64,85	24,73	42,58
2	Santa Cruz	35,89	62,40	29,57	42,62
3	Manrique	39,26	66,92	25,35	43,84
4	Aranjuez	33,80	52,55	24,35	36,90
5	Castila	29,60	60,51	8,68	32,93
6	Doce de Octubre	35,48	62,03	28,94	42,15
7	Robledo	31,06	57,96	2,84	30,62
8	Villa Hermosa	39,02	65,61	17,92	40,85
9	Buenos Aires	35,12	61,79	8,66	35,19
10	La Candelaria	37,50	38,51	8,22	28,08
11	Laureles Estadio	33,04	48,02	0,94	27,34
12	La América	30,92	58,81	14,94	34,89
13	San Javier	36,88	59,17	18,52	38,19
14	Poblado	22,42	41,10	0,56	21,36
15	Guayabal	32,99	59,86	2,57	31,81
16	Belén	29,29	56,92	8,95	31,72
50	Palmitas	39,28	58,37	28,63	42,10
60	San Cristóbal	41,17	66,96	6,32	38,15
70	Altavista	40,14	70,10	6,71	38,98
80	San Antonio de Prado	37,59	59,16	4,29	33,68
90	Santa Elena	41,13	70,69	16,15	42,66

## 8 REFERENCIAS

- Afriyie, K., Ganle, J. K., & Santos, E. (2018). 'The floods came and we lost everything': weather extremes and households' asset vulnerability and adaptation in rural Ghana. *Climate and Development*, 10(3), 259–274. <https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1291403>
- Agudelo-Suarez, A. A., Martinez-Herrera, E., Posado-Lopez, A., & Rocha-Buelvas, A. (2016). Ethnicity and Health in Colombia: What Do Self-perceived Health Indicators Tell Us? *Ethnicity & Disease*, 26(2), 147. <https://doi.org/10.18865/ed.26.2.147>
- Aguirre, & Rivera. (2018). *FLOOD EARLY WARNING SYSTEMS, MISCONCEPTION AND CHALLENGES-THE CASE OF COLOMBIA*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:244797478>
- Aicha O., Abdessamad G., & Hassane J. O. (2020). Groundwater Flooding in Urban Areas: Occurrence process, Potential Impacts and The Role Of Remote Sensing And GIS Techniques In Preventing It. *IEEE*.
- Alcaldía de Medellín. (2018). *libro\_indicadores\_2018*.
- Alcaldía de Medellín. (2020). *Comuna 11: Laureles Estadio Ficha de caracterización*. <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/PlaneacionMunicipal/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2021/Comuna%2011%20Laureles%20Estadio%20-Ficha%20Informativa.pdf>
- Alcaldía de Medellín. (2022). *Emergencias Emergencias y desastres y desastres Emergencias y desastres*.
- Alcaldía de Medellín. (2023). *Encuesta de Calidad de Vida 2022*. <https://www.medellin.gov.co/es/centro-documental/encuesta-de-calidad-de-vida-2022/>
- Andrade, M. M. N. de, & Szlafsztein, C. F. (2018). Vulnerability assessment including tangible and intangible components in the index composition: An Amazon case study of flooding and flash flooding. *Science of the Total Environment*, 630, 903–912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.271>

- Anees, M. T., Abu Bakar, A. F. Bin, San, L. H., Abdullah, K., Nordin, M. N. M., Rahman, N. N. N. A., Ishak, M. I. S., & Kadir, M. O. A. (2020). *Flood Vulnerability, Risk, and Susceptibility Assessment* (pp. 1–27). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9771-1.ch001>
- Balasbaneh, A. T., Abidin, A. R. Z., Ramli, M. Z., Khaleghi, S. J., & Marsono, A. K. (2020). Vulnerability assessment of building material against river flood water: Case study in Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 476(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012004>
- Banwell, S. (2020). *Gender and the Violence(s) of War and Armed Conflict*.
- Cadena-Vargas, E. (2021). Social vulnerability in Mexico: spatial distribution by electoral section. *Economía, Sociedad y Territorio*, 21(67), 893–917. <https://doi.org/10.22136/est20211776>
- Castellanos, M. A. R. (2021). *Los estragos que dejaron las fuertes lluvias en Medellín este jueves*. <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/medellin-fuertes-lluvias-causan-estragos-en-la-tarde-de-hoy-586608>
- Chakraborty, L., Rus, H., Henstra, D., Thistlethwaite, J., & Scott, D. (2020). A place-based socioeconomic status index: Measuring social vulnerability to flood hazards in the context of environmental justice. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 43, 101394. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101394>
- Chang, S. E., Yip, J. Z. K., van Zijl de Jong, S. L., Chaster, R., & Lowcock, A. (2015). Using vulnerability indicators to develop resilience networks: a similarity approach. *Natural Hazards*, 78(3), 1827–1841. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1803-x>
- Chen, N., Yao, S., Wang, C., & Du, W. (2019). A method for urban flood risk assessment and zoning considering road environments and terrain. *Sustainability (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/su11102734>
- Chen, Y., Liu, T., Ge, Y., Xia, S., Yuan, Y., Li, W., & Xu, H. (2021). Examining social vulnerability to flood of affordable housing communities in Nanjing, China: Building long-term disaster resilience of low-income communities. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102939. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102939>

- Cruz, M., & Ahmed, S. A. (2018). On the impact of demographic change on economic growth and poverty. *World Development*, 105, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.12.018>
- DAGR. (2022). *Estudios-de-riesgo-de-detalle-Resolucion-202250081537-DE-2022*.
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- DANE. (2019). *Inicio*. <https://www.dane.gov.co>
- DANE. (2023). *DANE - Encuesta nacional de calidad de vida (ECV) 2022*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2022>
- David S. Rickless Xiaobai A. Yao, B. O., & Welch-Devine, M. (2020). Assessing Social Vulnerability through a Local Lens: An Integrated Geovisual Approach. *Annals of the American Association of Geographers*, 110(1), 36–55. <https://doi.org/10.1080/24694452.2019.1625750>
- De la Rosa Olivas, L. A., & Montoya Reyes, E. (2023). Índice de Vulnerabilidad Urbana Global en Camino Verde, Tijuana: Indicadores con Perspectiva Integral y Actualizada. *Procesos Urbanos*, 10(2), e645. <https://doi.org/10.21892/2422085x.645>
- de Loyola Hummell, B. M., Cutter, S. L., & Emrich, C. T. (2016). Social Vulnerability to Natural Hazards in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7(2), 111–122. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0090-9>
- De Silva, M. M. G. T., & Kawasaki, A. (2018). Socioeconomic Vulnerability to Disaster Risk: A Case Study of Flood and Drought Impact in a Rural Sri Lankan Community. *Ecological Economics*, 152, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.05.010>
- Deepak, S., Rajan, G., & Jairaj, P. G. (2020). Geospatial approach for assessment of vulnerability to flood in local self governments. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00172-w>

- Desmond, M., & Shollenberger, T. (2015). Forced Displacement From Rental Housing: Prevalence and Neighborhood Consequences. *Demography*, 52(5), 1751–1772. <https://doi.org/10.1007/s13524-015-0419-9>
- DNP. (2015). *03 Índice de Vulnerabilidad final*.
- Dong, S., Esmalian, A., Farahmand, H., & Mostafavi, A. (2020). An integrated physical-social analysis of disrupted access to critical facilities and community service-loss tolerance in urban flooding. *Computers, Environment and Urban Systems*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101443>
- Doyle, C. (2019). Perceptions and realities of violence in Medellín, Colombia. *International Journal for Crime, Justice and Social Democracy*, 8(2), 149–166. <https://doi.org/10.5204/ijcjsd.v8i2.1010>
- El Colombiano. (2022, March). *Aguacero dejó casas inundadas, carros arrastrados y árboles caídos en Medellín*. <https://www.elcolombiano.com/antioquia/fuerte-aguacero-afectivos-varios-barrios-y-comunas-de-medellin-este-domingo-JN19278450>
- El Colombiano. (2023, March). *Revelan pruebas contra la Alcaldía por muerte de dos personas en la inundación del deprimido de los músicos*. <https://www.elcolombiano.com/medellin/pruebas-contra-la-alcaldia-de-medellin-por-muerte-en-el-deprimido-de-los-musicos-CA23109083>
- El Tiempo. (2023). *Estos son los barrios más violentos de Medellín*. <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/medellin-estos-son-los-barrios-mas-violentos-de-la-ciudad-785393>
- Figueiredo, L., Honiden, T., & Schumann, A. (2018). *Indicators for Resilient Cities*. <https://doi.org/10.1787/6f1f6065-en>
- Garbutt, K., Ellul, C., & Fujiyama, T. (2015). Mapping social vulnerability to flood hazard in Norfolk, England. *Environmental Hazards*, 14(2), 156–186. <https://doi.org/10.1080/17477891.2015.1028018>
- García, C. (2022). *Gender-based violence in times of war and armed conflicts*. <https://iggeo.org/?p=7549&lang=en>

- Garcia, R. A., Allen, J. L., & Clusella-Trullas, S. (2019). Rethinking the scale and formulation of indices assessing organism vulnerability to warmer habitats. *Ecography*, *42*(5), 1024–1036. <https://doi.org/10.1111/ecog.04226>
- Genes, L. S., Montoya, R. D., & Osorio, A. F. (2021). Costal sea level variability and extreme events in Moñitos, Cordoba, Colombian Caribbean Sea. *Continental Shelf Research*, *228*. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104489>
- Haque, A. N. (2021). Climate risk responses and the urban poor in the global South: the case of Dhaka's flood risk in the low-income settlements. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *64*. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102534>
- Haque, D. M. E., Mimi, A., Mazumder, R. K., & Salman, A. M. (2020). Evaluation of natural hazard risk for coastal districts of Bangladesh using the INFORM approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *48*. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101569>
- Hollin, I. L., Caroline Young, Hanson, C., Bridges, J. F. P., & Peay, H. (2016). Developing a Patient-Centered Benefit-Risk Survey: A Community-Engaged Process. *Value in Health*, *19*(6), 751–757. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2016.02.014>
- Hoque, M. A. A., Tasfia, S., Ahmed, N., & Pradhan, B. (2019). Assessing spatial flood vulnerability at kalapara upazila in Bangladesh using an analytic hierarchy process. *Sensors (Switzerland)*, *19*(6). <https://doi.org/10.3390/s19061302>
- Hossain, Md. N., & Paul, S. K. (2018). Vulnerability Factors and Effectiveness of Disaster Mitigation Measures in the Bangladesh Coast. *Earth Systems and Environment*, *2*(1), 55–65. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0034-1>
- Idier, D., Rohmer, J., Pedreros, R., Le Roy, S., Lambert, J., Louisor, J., Le Cozannet, G., & Le Cornec, E. (2020). *Coastal flood: a composite method for past events characterisation providing insights in past, present and future hazards-joining historical, statistical and modelling approaches*. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03882-4>

- IPCC. (2021). *Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate*.  
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/>
- Jose, R., Apura, R., Torre, D., Blanco, A., Cruz, P., Rollan, T., Tañada, E., Laurente, J., Gatdula, N., & Macatulad, E. (2017). *Assessing the Vulnerability of Agricultural Crops to Riverine Floods in Kalibo, Philippines using Composite Index Method*.
- Karagiorgos, K., Thaler, T., Hübl, J., Maris, F., & Fuchs, S. (2016). Multi-vulnerability analysis for flash flood risk management. *Natural Hazards*, 82, 63–87.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-016-2296-y>
- Khajehei, S., Ahmadalipour, A., Shao, W., & Moradkhani, H. (2020). A Place-based Assessment of Flash Flood Hazard and Vulnerability in the Contiguous United States. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57349-z>
- Kolios, P., Koumidis, K., Panayiotou, C., & Ellinas, G. (2020). Beaconing-based networking for localized information exchange in emergency management. *Ad Hoc Networks*, 107, 102225. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102225>
- Koyell Sam, & Namitaa Chakma. (2021). *KoyellSam NamitaaChakma Climate Change in theForest offBengal Duars Response of Life and Livelihoods*.  
<http://www.springer.com/series/8868>
- Krstic, N., Yuchi, W., Ho, H. C., Walker, B. B., Knudby, A. J., & Henderson, S. B. (2017). The Heat Exposure Integrated Deprivation Index (HEIDI): A data-driven approach to quantifying neighborhood risk during extreme hot weather. *Environment International*, 109, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.09.011>
- Lee, J. Y., & Van Zandt, S. (2019). Housing Tenure and Social Vulnerability to Disasters: A Review of the Evidence. *Journal of Planning Literature*, 34(2), 156–170.  
<https://doi.org/10.1177/0885412218812080>
- López-Valencia, A. P. (2019). Vulnerability assessment in urban areas exposed to flood risk: methodology to explore green infrastructure benefits in a simulation scenario involving the Cañaveralejo River in Cali, Colombia. *Natural Hazards*, 99(1), 217–245.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-019-03736-8>

- Lu, C.-H. (2018). Social status, compulsory education, and growth. *Economic Modelling*, 68, 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2017.08.013>
- Luskova, M., & Leitner, B. (2021). Measuring Societal Vulnerability to Critical Infrastructure Failure due to Extreme Weather Events. *Journal of International Business Research and Marketing*, 6(6), 13–19. <https://doi.org/10.18775/jibrm.1849-8558.2015.66.3002>
- Malakar, K., & Mishra, T. (2017). Assessing socio-economic vulnerability to climate change: a city-level index-based approach. *Climate and Development*, 9(4), 348–363. <https://doi.org/10.1080/17565529.2016.1154449>
- Maldonado, A., Collins, T. W., & Grineski, S. E. (2016). Hispanic Immigrants' Vulnerabilities to Flood and Hurricane Hazards in Two United States Metropolitan Areas. *Geographical Review*, 106(1), 109–135. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2015.12103.x>
- Mansur, A. V., Brondízio, E. S., Roy, S., Hetrick, S., Vogt, N. D., & Newton, A. (2016). An assessment of urban vulnerability in the Amazon Delta and Estuary: a multi-criterion index of flood exposure, socio-economic conditions and infrastructure. *Sustainability Science*, 11(4), 625–643. <https://doi.org/10.1007/s11625-016-0355-7>
- Martin, G. (2019). Violence and memory in Medellín. In *HiSTORELo* (Vol. 11, Issue 22, pp. 342–367). Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.15446/historelo.v11n22.78131>
- Medellín Cómo Vamos. (2016). *Seguridad ciudadana*.
- Medina, N., Abebe, Y. A., Sanchez, A., & Vojinovic, Z. (2020). Assessing socioeconomic vulnerability after a hurricane: A combined use of an index-based approach and principal components analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/su12041452>
- Mello Rezende, G. B. de. (2016). Social Vulnerability Index: A Methodological Proposal for Application in the Cities of Barra do Garcas—MT, Pontal Do Araguaia—MT and Aragarcas—GO, Brazil. *Open Journal of Social Sciences*, 04(12), 32–45. <https://doi.org/10.4236/jss.2016.412004>



- Metcalfe, S. J., van Putten, E. I., Frusher, S., Marshall, N. A., Tull, M., Caputi, N., Haward, M., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Jennings, S. M., Pecl, G. T., & Shaw, J. (2015). Measuring the vulnerability of marine social-ecological systems: a prerequisite for the identification of climate change adaptations. *Ecology and Society*, 20(2), art35. <https://doi.org/10.5751/ES-07509-200235>
- Morán, M. (2023). *Riesgo de deslizamientos e inundaciones en Medellín producto de la ola invernal*. <https://www.personeriamedellin.gov.co/riesgo-de-deslizamientos-e-inundaciones-en-medellin-producto-de-la-ola-invernal/>
- Mucherera, B., & Spiegel, S. (2022). Forced displacement: critical lessons in the protracted aftermath of a flood disaster. *GeoJournal*, 87(5), 3855–3875. <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10471-w>
- Mudavanhu, C., Manyangadze, T., Mavhura, E., Pedzisai, E., & Manatsa, D. (2020). Rural households' vulnerability and risk of flooding in Mbire District, Zimbabwe. *Natural Hazards*, 103(3), 3591–3608. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04145-y>
- Muthusamy, M., G., Rivas Casado, M., S., Irvine, T., & Leinster, P. (2020). A remote sensing based integrated approach to quantify the impact of fluvial and pluvial flooding in an urban catchment. *EGU General Assembly*.
- Navarro, O. (2017). *Social Inequality and Environmental Risk Perception* (pp. 503–518). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-31416-7\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31416-7_27)
- Nelson, K. S., Abkowitz, M. D., & Camp, J. V. (2015). A method for creating high resolution maps of social vulnerability in the context of environmental hazards. *Applied Geography*, 63, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.011>
- Nguyen, C. V., Horne, R., Fien, J., & Cheong, F. (2017). Assessment of social vulnerability to climate change at the local scale: development and application of a Social Vulnerability Index. *Climatic Change*, 143(3–4), 355–370. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2012-2>
- OYOYA, Z. M. (2021). Poverty And Vulnerability To Poverty: Conceptual Overview, Measurements And Causes. *International Journal of Scientific and Research*

- Publications (IJSRP)*, 11(8), 378–394.  
<https://doi.org/10.29322/ijssrp.11.08.2021.p11649>
- Papathoma-Köhle, M., Schlögl, M., & Fuchs, S. (2019). Vulnerability indicators for natural hazards: an innovative selection and weighting approach. *Scientific Reports*, 9(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-50257-2>
- Paranunzio, R., Guerrini, M., Dwyer, E., Alexander, P. J., & O'Dwyer, B. (2022). Assessing Coastal Flood Risk in a Changing Climate for Dublin, Ireland. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/jmse10111715>
- Parry, L., Davies, G., Almeida, O., Frausin, G., de Moraes, A., Rivero, S., Filizola, N., & Torres, P. (2018). Social Vulnerability to Climatic Shocks Is Shaped by Urban Accessibility. *Annals of the American Association of Geographers*, 108(1), 125–143.  
<https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1325726>
- Perez, L., Rios, D. A., Giraldo, D. C., Twyman, J., Blundo-Canto, G., Prager, S. D., & Ramirez-Villegas, J. (2020). Determinants of vulnerability of bean growing households to climate variability in Colombia. *Climate and Development*, 12(8), 730–742.  
<https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1685931>
- Piedrahita Tamayo, N. (2023). *Desbordamientos e inundaciones, campanazos en la agenda de ciudad*. <https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/>
- Prokić, M., Savić, S., & Pavić, D. (2019). Pluvial flooding in Urban Areas Across the European Continent. *Geographica Pannonica*, 23(4), 216–232.  
<https://doi.org/10.5937/gp23-23508>
- Proverbs, D., & Lamond, J. (2017). Flood Resilient Construction and Adaptation of Buildings. In *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.111>
- Rainear, A. M., & Lin, C. A. (2021). Communication factors influencing flood-risk-mitigation motivation and intention among college students. *Weather, Climate, and Society*, 13(1), 125–135. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-20-0016.1>

- Reiss, J., Perkins, D. M., Fussmann, K. E., Krause, S., Canhoto, C., Romeijn, P., & Robertson, A. L. (2019). Groundwater flooding: Ecosystem structure following an extreme recharge event. *Science of the Total Environment*, 652, 1252–1260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.216>
- Roder, G., Sofia, G., Wu, Z., & Tarolli, P. (2017). Assessment of Social Vulnerability to floods in the floodplain of northern Italy. *Weather, Climate, and Society*, 9(4), 717–737. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0090.1>
- Roncancio, D. J., Cutter, S. L., & Nardocci, A. C. (2020). Social vulnerability in Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101872>
- Roy, D. C., & Blaschke, T. (2015). Spatial vulnerability assessment of floods in the coastal regions of Bangladesh. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(1), 21–44. <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.816785>
- Sahar, L., Nogueira, L. M., Ashkenazi, I., Jemal, A., Yabroff, K. R., & Lichtenfeld, J. L. (2020). When disaster strikes: The role of disaster planning and management in cancer care delivery. In *Cancer* (Vol. 126, Issue 15, pp. 3388–3392). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/cncr.32920>
- Sedano-Cruz, K., Carvajal-Escobar, Y., & Díaz, J. Á. (n.d.). *ANÁLISIS DE ASPECTOS QUE INCREMENTAN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN COLOMBIA ANALYSIS OF THE ASPECTS WHICH INCREASE THE RISK OF FLOODS IN COLOMBIA*.
- Senan, C. P. C., Ajin, R. S., Danumah, J. H., Costache, R., Arabameri, A., Rajaneesh, A., Sajinkumar, K. S., & Kuriakose, S. L. (2023). Flood vulnerability of a few areas in the foothills of the Western Ghats: a comparison of AHP and F-AHP models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(2), 527–556. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02267-2>
- Sertyesilisik, P. (2017). *Assessing Urban Flood Risk with Probabilistic Approaches*.
- SIATA. (2010). *SIATA - Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá*. [https://siata.gov.co/sitio\\_web/index.php/quienesSomos](https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/quienesSomos)

- Siegel, F. R. (2020). *Coastal City Flooding* (pp. 27–34). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22669-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22669-5_4)
- Sorg, L., Medina, N., Feldmeyer, D., Sanchez, A., Vojinovic, Z., Birkmann, J., & Marchese, A. (2018). Capturing the multifaceted phenomena of socioeconomic vulnerability. *Natural Hazards*, *92*(1), 257–282. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3207-1>
- Spielman, S. E., & Folch, D. C. (2015). Reducing uncertainty in the American Community Survey through data-driven regionalization. *PLoS ONE*, *10*(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115626>
- Spielman, S. E., Tuccillo, J., Folch, D. C., Schweikert, A., Davies, R., Wood, N., & Tate, E. (2020). Evaluating social vulnerability indicators: criteria and their application to the Social Vulnerability Index. *Natural Hazards*, *100*(1), 417–436. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03820-z>
- Subdirección de Planeación Territorial y Estratégica de Ciudad. (2024). *Amenaza por inundaciones / Datos Abiertos Colombia*. [https://www.datos.gov.co/Ordenamiento-Territorial/Amenaza-por-inundaciones/x94h-qvvx/about\\_data](https://www.datos.gov.co/Ordenamiento-Territorial/Amenaza-por-inundaciones/x94h-qvvx/about_data)
- Tascón-González, L., Ferrer-Julià, M., Ruiz, M., & García-Meléndez, E. (2020). Social vulnerability assessment for flood risk analysis. *Water (Switzerland)*, *12*(2). <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>
- Torales, J. C., Castaldelli-Maia, J. M., O'Higgins, M. G., Florio, L., Almirón Santacruz, J., Barrios, J. I., Navarro, R., García, O. E., Day, G., Bhugra, D., Sri, A. S., Ventriglio, A., & Persaud, A. (2021). Índice de vulnerabilidad CAPE: Compasión, Acción Asertiva, Pragmatismo y Evidencia - Versión para América Latina y el Caribe (CAPE VI - LAC) “Globalización, conflicto, cambio climático, desastres naturales: poner la salud mental en la política exterior.” *Anales de La Facultad de Ciencias Médicas (Asunción)*, *54*(1), 21–50. <https://doi.org/10.18004/anales/2021.054.01.21>

- Török, I., Croitoru, A. E., & Man, T. C. (2021). Assessing the impact of extreme temperature conditions on social vulnerability. *Sustainability (Switzerland)*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/su13158510>
- UNESCO-IHE. (n.d.). *Flood Vulnerability Indices (FVI) Vulnerability*. Retrieved March 28, 2024, from [http://unihefvi.free.fr/flood\\_vulnerability\\_factors.php](http://unihefvi.free.fr/flood_vulnerability_factors.php)
- Van Ackere, S., Verbeurgt, J., De Sloover, L., Gautama, S., De Wulf, A., & De Maeyer, P. (2019). A review of the internet of floods: Near real-time detection of a flood event and its impact. In *Water (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w11112275>
- Vyas, S., & Kumaranayake, L. (2006). Constructing socio-economic status indices: How to use principal components analysis. *Health Policy and Planning*, 21(6), 459–468. <https://doi.org/10.1093/heapol/czl029>
- Wahid, S. K. M., Malalassam, D., Barkey, R. A., & Baharuddin. (2021). Impact of human and environmental interactions on flooding incident in the Jeneberang River South Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 886(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/886/1/012105>
- Werner, M., Loaiza, J. C., Rosero Mesa, M. C., Faneca Sánchez, M., de Keizer, O., & Sandoval, M. C. (2016). Chapter 12 - Developing Flood Forecasting Capabilities in Colombia (South America). In T. E. Adams & T. C. Pagano (Eds.), *Flood Forecasting* (pp. 349–368). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801884-2.00012-8>
- Willems, D. (2020). *Water governance challenges in Colombia*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221493270>
- Wu, C. C., Jhan, H. T., Ting, K. H., Tsai, H. C., Lee, M. T., Hsu, T. W., & Liu, W. H. (2016). Application of social vulnerability indicators to climate change for the southwest coastal areas of Taiwan. *Sustainability (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/su8121270>

- Yang, Q., Zhang, S., Dai, Q., & Yao, R. (2020). Improved framework for assessing vulnerability to different types of urban floods. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/su12187668>
- Young, A., Bhattacharya, B., & Zevenbergen, C. (2020). Pluvial flood forecasting in urban data-scarce regions: Influence of rainfall spatio-temporal data (in)accuracy on decision-making. *EGU General Assembly*.
- Zanetti, V. B., Junior, W. C. de S., & De Freitas, D. M. (2016). A climate change vulnerability index and case study in a Brazilian Coastal City. *Sustainability (Switzerland)*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/su8080811>