INVESTIGACIÓN ____ PROFUNDIZACIÓN _X_

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RESILIENCIA ANTE EVENTOS SÍSMICOS DE LA UNIDAD DE PLANEAMIENTO LOCAL - UPL TUNJUELITO, EN BOGOTÁ, MEDIANTE EL USO DE UNA METODOLOGÍA DESCRIPTIVA DE SISTEMAS COMPLEJOS

Autores

Nancy Viviana Roncancio Cabrejo

Jan Stevens Vargas Cardona

Tutor

PhD. Ing. Jorge Arturo Pineda Jaimes

Universidad Distrital Francisco José De Caldas

Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

Año 2026

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación culmina un periodo importante en mi relación con la Academia y con la Universidad Distrital, quien me recibió siendo un bachiller y me ayudó a convertirme en un elemento que puede aportar al desarrollo de su sociedad usando la ciencia como base. Con todo mi corazón agradezco a cada persona que dispuso de su tiempo, su conocimiento y su infraestructura para contribuir a este logro. A nuestro director por la disposición siempre de guiarnos en este viaje y a los maestros que compartieron con nosotros la información que ha desembocado en este documento. También agradezco a mi familia por el apoyo continuo y las palabras que motivaron momentos de pocas luces en mi vida académica, a Dios por la salud y la integridad que en estos días de tragedia nacional se agradecen tanto y a Evoleth Sofía por ser una razón que me impulsa a trabajar por un mundo mejor para las generaciones futuras.

Jan Stevens Vargas Cardona

Agradezco a Dios por la vida, la salud y por permitirme llegar hasta este momento. A mi madre y a mi familia, por su amor, apoyo y compañía durante todo este proceso, especialmente en los momentos más difíciles. También agradezco al profesor Jorge Arturo Pineda Jaimes, tutor de este trabajo, por su orientación, sus enseñanzas y el acompañamiento brindado durante el desarrollo de esta investigación. Finalmente, a todas las personas que de alguna manera hicieron parte de este camino y aportaron para que hoy pudiera alcanzar esta meta.

Nancy Viviana Roncancio Cabrejo

CONTENIDO

Agradecimientos 2

1. Resumen 8

Palabras clave 9

Abstract 10

Keywords 11

2. INTRODUCCIÓN 12

1.1. Objetivos 14

2.1.1 OBJETIVO GENERAL 14

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 15

3.1 Descripción del problema 15

3.2 Planteamiento del problema 17

3.3 Justificación 19

4. MARCO DE REFERENCIA 22

4.1 Estado del arte 22

4.2 Marco espacial 27

4.3 Marco Teórico 30

4.3.1 Lógica difusa 30

4.3.2 Análisis de grafos aplicado a redes 33

4.3.3 Resiliencia en ingeniería 36

5. METODOLOGÍA 48

5.1 Introducción 48

5.2 Parámetros de evaluación de la resiliencia urbana ante eventos sísmicos 49

5.2.1 Redundancia 49

5.2.2 Capacidad de gestión 55
5.2.3 Capacidad de Respuesta 62
5.2.4 Robustez 66
5.3 Capacidad de resiliencia 77
5.4 Empleo de Matlab el análisis de las variables con lógica difusa 86
5.5 Análisis de sensibilidad 87
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS 88
6.1 Redundancia 88
6.2 Capacidad de gestión 92
6.3 Respuesta 104
6.4 Robustez 117
6.5 Capacidad de Resiliencia 126
6.5.1 Análisis de sensibilidad 129
6.6 Efectos del sismo del 10/08/2026 sobre la UPL vs estimación de resiliencia 129
6.7 Efectos del sismo del en el eje cafetero y el valle del cauca 134
7. CONCLUSIONES 138
8. RECOMENDACIONES 145
9. LIMITACIONES 148
10. COMENTARIOS FINALES 150
11. REFERENCIAS 151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de sistemas de información geográfica 29
Tabla 2 Perfiles de suelo UPL Tunjuelito 43
Tabla 3 Efectos locales UPL Tunjuelito 44
Tabla 4 Relación capacidad de gestión e instrumentos de gestión de riesgos 57
Tabla 5 Relación capacidad de gestión y presencia de entidades u organismos de atención articuladas 58
Tabla 6 Relación capacidad de gestión y estratificación socioeconómica 58
Tabla 7 Sistema difuso de entrada de capacidad de gestión 58
Tabla 8 Sistema difuso de salida de capacidad de gestión 59
Tabla 9 Reglas de inferencia de capacidad de gestión 60
Tabla 10 Sistema difuso de entrada de respuesta 63
Tabla 11 Sistema difuso de salida de respuesta 63
Tabla 12 Reglas de inferencia de respuesta 64
Tabla 13 Relación robustez y riesgo de perfil de suelo 70
Tabla 14 Relación robustez y función post desastre 71
Tabla 15 Sistema difuso de entrada de robustez 71
Tabla 16 Sistema difuso de salida de robustez 72
Tabla 17 Reglas de inferencia de robustez 72
Tabla 18 Sistema difuso de entrada de Capacidad de Resiliencia 79
Tabla 19 Sistema difuso de salida Capacidad de Resiliencia 79
Tabla 20 Reglas de inferencia Capacidad de Resiliencia 80
Tabla 21. Componentes de las redes de acueducto 88
Tabla 22 Valores de resiliencia calculada para las redes 92
Tabla 23 Instrumentos de gestión del riesgo 95
Tabla 24. Instituciones de atención a emergencias 98
Tabla 25 Presencia de entidades u organismos de atención 100
Tabla 26. Distribución de estratos por manzana 102
Tabla 27 Condiciones socioeconómicas de la población 103
Tabla 28 Capacidad de gestión 103
Tabla 29 Colegios UPL Tunjuelito 106

Tabla 30 Espacios de apoyo comunitario 110
Tabla 31 Ponderación vías de acceso 111
Tabla 32 Cobertura de servicios públicos 114
Tabla 33 Valoración del factor de respuesta 115
Tabla 34. Datos de respuesta sísmica 118
Tabla 35. Lotes según número de pisos 120
Tabla 36. Cantidad de habitantes por edificio 121
Tabla 37. Distribución de uso del suelo 123
Tabla 38 Capacidad de Resiliencia 127
Tabla 39 Variación del índice de capacidad de resiliencia con un factor a la vez 129
Tabla 40 Reporte del PMU 13/08/2026 135

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.Escenarios de riesgo sísmico de Bogotá 18
Ilustración 2. Gráfico de la arquitectura de un sistema 24
Ilustración 3. Topologías de red para análisis de redundancia 25
Ilustración 4. UPL Tunjuelito 28
Ilustración 5. Tanque de almacenamiento, ilustración para definición de variables lingüísticas y conjuntos 31
Ilustración 6. Funciones de membresía de los conjuntos difusos Ad, Bd, Cd 32
Ilustración 7. Medidas de resiliencia ante eventos sísmicos 36
Ilustración 8. Modelo de causalidad (queso suizo) para la gestión de riesgos 39
Ilustración 9. Relación entre los componentes de gestión de riesgo y los factores de la resiliencia en la Ingeniería Civil 40
Ilustración 10. Tiempo vs Desarrollo de una ciudad resiliente y una ciudad no resiliente 40
Ilustración 11. Microzonificación sísmica Bogotá de la UPL Tunjuelito 42
Ilustración 12 Espectro de aceleraciones seguridad limitada 45
Ilustración 13 Comparación de espectros de aceleración 46
Ilustración 14 depuración de enlaces huérfanos 52
Ilustración 15 anexión de ciclos huérfanos 52
Ilustración 16 Ajuste de nodos 53

Ilustración 17 Lógica difusa de capacidad de gestión 61
Ilustración 18 Superficie de control de capacidad de gestión 61
Ilustración 19 Lógica difusa de Respuesta 65
Ilustración 20 Superficie de control de respuesta 65
Ilustración 21 Sistema Difuso para cálculo robustez 76
Ilustración 22 Superficie cálculo robustez 76
Ilustración 23 Estructura sistema difuso capacidad de Resiliencia 84
Ilustración 24 Superficie de control Capacidad de Resiliencia 85
Ilustración 25 Grafo de la red de alcantarillado pluvial 89
Ilustración 26 Grafo de la red de alcantarillado sanitario 90
Ilustración 27 Grafo de la red de acueducto 91
Ilustración 28 Grafo de la malla vial 91
Ilustración 29 Instrumentos de gestión del riesgo 95
Ilustración 30 Hospitales y Centros de salud UPL Tunjuelito 97
Ilustración 31 Estaciones de bomberos UPL Tunjuelito 98
Ilustración 32. Cobertura institucional de emergencias 99
Ilustración 33. Estrato según manzana 101
Ilustración 34 Aplicación lógica difusa de capacidad de gestión 104
Ilustración 35 Colegios UPL Tunjuelito 108
Ilustración 36 Parques UPL Tunjuelito, zonas abiertas 109
Ilustración 37 Cobertura servicios públicos UPL Tunjuelito 113
Ilustración 38 Aplicación lógica difusa en respuesta 116
Ilustración 39. Número de pisos promedio por manzana 120
Ilustración 40. Distribución de uso del suelo 123
Ilustración 41 Aplicación de lógica difusa criterio de robustez 126
Ilustración 42 Aplicación lógica difusa de capacidad de resiliencia 128
Ilustración 43 Espectros de respuesta Anserma y Manizales 130
Ilustración 44 Reporte preliminar del impacto del sismo en la ciudad de Bogotá D.C 130
Ilustración 45 Aceleraciones pico registradas cerca de Bogotá 131
Ilustración 46 Mapa de sacudida, sismo 10/08/2026 132
Ilustración 47 Afectaciones en el conjunto San Pedro 2, Mazuren, Bogotá 133
Ilustración 48 Mapa de intensidades macrosícmicas 10/08/2026 135

1. RESUMEN

Los planes de respuesta ante desastres en Colombia y puntualmente en Bogotá actualmente contemplan escenarios de daño y exponen una toma de decisiones basada en los impactos iniciales de un evento sísmico, ignorando la integralidad de los territorios y los elementos que componen la capacidad de soportar eventos y el tiempo de recuperación. Esta investigación evaluó la resiliencia ante eventos sísmicos del tipo “sismo de diseño” definido por la normativa nacional (NSR-10) y parametrizado con los valores de la normativa distrital (decreto 523 de 2010), de una Unidad de Planeamiento Local (UPL) en Bogotá, enfocada en la infraestructura y el componente político que contiene a los planes y normativa de respuesta ante eventos sísmicos.

Para el desarrollo del trabajo se escogió la UPL Tunjuelito, principalmente por la disponibilidad de información acelerográfica, pues era una de las pocas unidades que contaba con más de un sensor para el análisis, incluyendo registros en superficie y en profundidad. También se tuvo en cuenta que, frente a otras alternativas, esta UPL reunía condiciones más útiles para el estudio, como variaciones en el terreno, diversidad de edificaciones, presencia de construcción informal y situaciones urbanas que podían hacer más exigente la evaluación.

Con base en esta selección, se caracterizó el territorio, se recopiló la información disponible y se definieron los sub-factores asociados a los cuatro criterios de resiliencia ante eventos sísmicos: robustez, redundancia, capacidad de gestión y respuesta ante el evento, de acuerdo con lo propuesto por (Bruneau & Chang, 2003): robustez del sistema, redundancia de elementos vitales, capacidad de gestión y respuesta ante el evento; Posteriormente, se organizó la información y, mediante metodologías descriptivas de sistemas complejos, se describió y ponderó la interacción entre los factores analizados, con el fin de estimar la capacidad de resiliencia del sistema y proponer una metodología aplicable al territorio estudiado; la cual guarda relación con el caso de estudio expuesto en (DELGADO, 2023), que también incorporó la lógica difusa.

El desarrollo de este estudio se hace dentro de la bibliografía que enmarca la definición, componentes y estudios de caso de la resiliencia ante eventos sísmicos, con el fin de presentar una metodología que pueda evaluar la capacidad del territorio estudiado para soportar un evento sísmico y recuperarse del mismo, con base en dos escenarios: la capacidad de servicio previa y posterior al suceso disruptivo.

Dentro de la caracterización de las UPL se presentó información de la infraestructura vital existente, la población, uso del suelo y la cantidad de sensores pertenecientes a la red de acelerógrafos de Bogotá (RAB). En el análisis de robustez, la vulnerabilidad de las edificaciones se estimó con el método HMC a partir de la microzonificación sísmica de Bogotá, la altura predominante, el uso del suelo y la ocupación de las edificaciones. Los registros acelerográficos de las estaciones cercanas se usaron para comparar la demanda sísmica registrada con el espectro de seguridad limitada de la microzonificación.

El aporte del proyecto consiste en proponer una metodología diagnóstica para estimar la capacidad de resiliencia ante eventos sísmicos de diseño en una UPL, a partir de variables seleccionadas para valorar la redundancia, la capacidad de gestión, la respuesta y la robustez del territorio, de manera que pueda servir como insumo para la planeación urbana, la gestión de activos y la toma de decisiones en el marco de la gestión del riesgo sísmico distrital.

PALABRAS CLAVE

Resiliencia ante eventos sísmicos

Política de riesgo

Evento disruptivo

Sistemas complejos

Lógica difusa

ABSTRACT

Disaster response plans in Bogotá currently consider damage scenarios and support decision-making mainly based on the initial impacts of a seismic event, without fully addressing the territorial complexity and the elements that influence the capacity to withstand an event and the time required for recovery. This research evaluated resilience to seismic events associated with the “design earthquake,” as defined by the Colombian seismic-resistant building code, NSR-10, and parameterized with the values established in Bogotá’s district regulation, Decree 523 of 2010, for a Local Planning Unit, UPL, in Bogotá. The study focused on infrastructure conditions and on the institutional component related to plans and regulations for seismic emergency response.

The UPL Tunjuelito was selected primarily because accelerograph data were available, as it was one of the few local planning units with more than one sensor for the analysis, including surface and downhole records. Compared with other alternatives, this UPL also offered more relevant conditions for the study, including terrain variability, a diverse building stock, informal construction, and urban conditions that made the evaluation more demanding.

Based on this selection, the territory was characterized, the available information was collected, and the subfactors associated with four seismic resilience criteria were defined: robustness, redundancy, management capacity and event response, according to the approach proposed by (Bruneau & Chang, 2003), The information was then organized and, through descriptive methodologies of complex systems, the interaction between the analyzed factors was described and weighted in order to estimate the resilience capacity of the system and propose a methodology applicable to the studied territory. This approach is related to the case study presented by (DELGADO, 2023), which also incorporated fuzzy logic as part of the resilience assessment process.

The study was developed within the literature that frames the definition, components and case studies of resilience to seismic events, with the purpose of presenting a methodology capable of evaluating the capacity of the studied territory to withstand a seismic event and

recover from it, based on two scenarios: service capacity before and after the disruptive event.

As part of the characterization of the UPL, information has been included on existing vital infrastructure, population, land use, and the number of sensors belonging to Bogotá's Accelerograph Network, RAB. In the robustness analysis, numerical simulations were conducted to estimate the damage produced by a design earthquake in several representative building types within the UPL; these models has been calibrated using the accelerograph records from the sensor or sensors identified during the characterization stage.

The contribution of this project consists of proposing a diagnostic methodology to estimate the resilience capacity to design seismic events in a UPL, based on selected variables used to assess redundancy, management capacity, response, and territorial robustness. This methodology may serve as an input for urban planning, asset management, and decision-making within the framework of district seismic risk management.

KEYWORDS

Resilience to seismic events

Risk policy

Disruptive event

Complex systems

Fuzzy logic

2. INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo de los cascos urbanos durante las últimas décadas ha configurado un entorno urbano que ya sea sub-sectorizado o no, tiene múltiples actores, sistemas y relaciones que hacen de este entorno un sistema hipercomplejo cuyos análisis deben segmentarse en aras de aproximar con niveles aceptables de confiabilidad la respuesta del sistema ante diferentes eventos.

Los eventos de tipo sísmico tienen, mayormente, el comportamiento de corta duración y efectos de largo plazo si se analizan en entornos urbanos o geotécnicos, debido a la transformación del entorno bajo movimientos de alta energía, entonces el evento exige al entorno urbano una serie de planes y políticas para la gestión de este tipo de eventos.

Sismos como el ocurrido el 24 de Junio de 2026 en Venezuela, con epicentro en el estado de la Guaira y el ocurrido el 10 de Agosto de 2026 en Colombia, con epicentro en el municipio de San José del palmar, departamento de Chocó, permiten observar la capacidad destructiva de un sismo y la importancia de tener sistemas de respuesta que permitan disponer recursos en las primeras horas que resultan ser las más críticas para salvar a las personas atrapadas y atender a los heridos que resultan de un evento de este tipo.

La normativa local sugiere que los análisis de riesgos mezclan los tradicionales análisis de costo beneficio (ACB) con incorporaciones de resiliencia que responden al cambio global de paradigma sobre la mitigación del riesgo basado en costo-eficiencia hacia miradas holísticas con infraestructura adaptativa y sistemas resilientes.

La resiliencia ante eventos sísmicos es un tema de creciente importancia en la gestión de riesgos urbanos, especialmente en ciudades ubicadas en zonas de vulnerabilidad sísmica alta o intermedia como Bogotá, donde, si bien el término aparece en documentos de recuperación ante desastres, no se plantea como un eje de la gestión de riesgos urbanos ante eventos sísmicos.

El Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) llevó a cabo una microzonificación sísmica en Bogotá; este estudio permitió predecir el comportamiento sectorizado de la ciudad durante un sismo, con el fin de tomar medidas que mitiguen los

impactos de estos eventos, así como establecer recomendaciones precisas para el diseño y la construcción de edificaciones sismorresistentes.

En la búsqueda de profundizar este análisis y evaluar la posibilidad de recuperación post sismo se desarrolló el presente trabajo, el cual se enfocó en la evaluación de la resiliencia ante eventos sísmicos con base en la información distrital (Decreto 523 de 2010), de una Unidad de Planeamiento Local (UPL) en Bogotá. Dicho análisis presenta una herramienta que permitirá analizar la interacción entre factores físicos, funcionales, institucionales y sociales dentro del sistema urbano para tomar decisiones con respecto a la gestión de activos del territorio.

Este trabajo propone una metodología diagnóstica y replicable, útil para organizar la información disponible, relacionar variables heterogéneas y apoyar la toma de decisiones en procesos de planeación territorial y gestión del riesgo, sin pretender reemplazar estudios estructurales detallados ni modelaciones específicas por edificación.

1.1. OBJETIVOS

2.1.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar de manera diagnóstica la capacidad de resiliencia ante eventos sísmicos de diseño de la Unidad de Planeamiento Local (UPL) Tunjuelito, en Bogotá, a partir del análisis diagnóstico y de interacción de factores del sistema mediante el uso de la lógica difusa

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y operacionalizar los factores e indicadores de resiliencia ante eventos sísmicos de diseño aplicables a la UPL Tunjuelito, a partir de la caracterización de sus condiciones territoriales, demográficas, funcionales, institucionales y socioeconómicas.
- Incorporar la información de microzonificación sísmica de Bogotá y los registros acelerográficos disponibles como insumo para el análisis de robustez física y del comportamiento esperado de edificaciones representativas dentro de la UPL.
- Estructurar un sistema de valoración de la resiliencia urbana ante eventos sísmicos de diseño mediante lógica difusa, que permita integrar variables heterogéneas y representar la interacción entre redundancia, capacidad de gestión, respuesta y robustez

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La ley 1523 (2012) adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres, en sus artículos 4 y 33, este último modificado por la ley 2474 (2025) define los componentes del análisis y evaluaciones de riesgo con el implícito desarrollo de metodologías ACB (Análisis costo beneficio) en varios de sus numerales:

- Estimación del valor de los daños y las pérdidas potenciales, comparándolos con criterios de seguridad establecidos (Art. 4 Núm. 4)
- Identificación de escenarios de riesgo, su análisis, evaluación monitoreo y seguimiento de sus componentes (Art. 4 Núm. 11)
- Reducción o disminución de daños y pérdidas (Art. 4 Núm. 16)
- Definición del plan nacional de gestión de riesgo de desastres como instrumento que aplica las definiciones ya presentadas mediante los procesos de conocimiento y gestión del riesgo ya definidos.

Y el decreto 2157 (2017) de la presidencia de la república dicta las directrices para los planes de gestión del riesgo de entidades públicas y privadas. La subsección 1, artículo 2.3.1.5.2.1.1. numeral 2.1.1. presenta la identificación y selección de alternativas de intervención correctiva con base en análisis multicriterio, ACB o análisis costo efectividad.

Esta normativa indica una fuerte tendencia implícita en la gestión de activos para desastres hacia los ACB que se queda corta ante la hipercomplejidad de los sistemas urbanos, porque no integra las capacidades de recuperación del sistema en el tiempo, sino que se enfoca enérgicamente en la reducción de la pérdida financiera inmediata.

Los numerales 20 y 24 del artículo 4 de la 1523 (2012) hablan de acciones de recuperación y respuesta, pero no dentro de un análisis de resiliencia como tal, sin embargo, el acuerdo 927 (2024) del concejo de Bogotá D.C, presenta acercamientos sutiles al término, estableciendo la política de resiliencia urbana y gestión del riesgo en Bogotá, definiendo

criterios de mitigación del riesgo sísmico para obras de infraestructura pública. Los artículos 9,14 y 298 hacen acercamientos al término como una propiedad que debe tener el entorno urbano sin dar detalles adicionales, y el ítem 38 de las inversiones con cargo al sistema general de regalías presenta el centro Sinergia – resiliencia urbana, que es un programa educativo de inclusión del término en la narrativa académica.

El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (Naciones unidas, 2015) Presenta la adopción de la resiliencia como componente de las políticas para cambiar lo que el documento llama un “marcado énfasis puesto en la gestión del riesgo de desastres en lugar de la gestión de desastres” y esta es una de varias representaciones bibliográficas del cambio de paradigma sobre la gestión de desastres que incluye una visión más general de los sistemas y la interacción de sus componentes.

De acuerdo con lo anterior, en Colombia no existen planes o políticas de gestión del riesgo suficientemente estructurados que incorporen la resiliencia ante eventos sísmicos como una variable multifactorial para apoyar la toma de decisiones administrativas o la planeación de programas de recuperación post-sismo. Un análisis de resiliencia considera cuatro propiedades mediante las cuales se caracterizan elementos del sistema urbano, a partir de variables de control que describen su estado en el momento de análisis y su aporte a la capacidad del sistema hipercomplejo evaluado. Este tipo de análisis requiere metodologías de discretización y ponderación que permitan aproximar la capacidad del sistema sin desconocer su complejidad. Así, el diagnóstico resultante constituye una herramienta válida, replicable, adaptativa y útil para la administración de activos territoriales, al articular variables económicas, sociales e interregionales.

Una evaluación integral de las comunidades puede permitir planes de acción con mejores resultados a largo plazo: recuperación socioeconómica y protección de la vida de los habitantes de los territorios es una combinación que debe ser tenida en cuenta si se quiere preservar la calidad de vida de una comunidad y conservar sus subsistemas pare reducir el daño a su desempeño normal.

Si bien, se considera que se ha abordado el estudio de resiliencia ante eventos sísmicos de diseño y su incorporación en políticas públicas, el concepto no ha sido estudiado desde

un enfoque estructural que abarque modelaciones y se relacione con la política y normativa en Bogotá.

La amenaza sísmica en Bogotá y la necesidad inherente de estudiar la capacidad de recuperación de las UPL son temas relacionados y que pueden afectar la calidad de vida y capacidad de funcionamiento de la ciudad.

3.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Bogotá, como capital de Colombia, está situada en una zona de amenaza sísmica intermedia, en donde coexiste con escenarios de alta vulnerabilidad en las zonas donde los factores endógenos de las construcciones como la calidad de los materiales, procesos constructivos y parámetros normativos son pobres y en ocasiones no garantizan su estabilidad ante un evento sísmico, esto sumado con la variabilidad geológica y la densidad de población, hacen a algunas Unidades de Planeamiento Local (UPL) más vulnerables ante un evento disruptivo como el sismo. Actualmente los documentos de gestión de riesgo orientan las acciones económicas desde un diagnóstico posterior al evento y la prevención la enfocan en la sensibilización de información clave como planes de acción zonal post evento sísmico y normativa vigente. No existe un plan de ejecución o destinación de recursos basados en algún tipo de estratificación previa al sismo.

La modelación del riesgo sísmico en edificaciones para la ciudad de Bogotá, versión 2018 presenta 16 escenarios de riesgo sísmico con sus respectivos niveles, alcances y costo de daños esperados. Esta información se presenta en la Ilustración 1:



4.6 Resultados de los escenarios modelados

Costo del daño en edificaciones

No	Fuente Sísmica	Distancia Epicentro a Bogotá (km)	Magnitud del sismo	Manzanas con daño Leve y Moderado	Manzanas con daño Fuerte y Severo	Valor total de los daños (BDP)
1	Falla Frontal Cordillera Oriental	35	7.3[1]	23,300	15,565	62.39
2		40	7.0[2]	33,929	2,675	38.04
3		50	6.5[3]	12,327	17	8.12
4	Falla Usme	28	4.5	26 (leve)	-	0.23
5			5.8	7,532	26	3.65
6			7.1	19,492	19,357	59.10
7	Falla Guaicaramo Norte	99	4.5	-	-	0.23
8			6.1	129	-	0.37
9			7.5	23,102	32	16.45
10			7.8	33,473	483	26.66
11	Falla Ibagué	119	4.5	-	-	0.23
12			6.0	43 (leve)	-	0.26
13			7.5	19,422	25	9.75
14	Falla Algeciras-Balsillas	129	4.5	-	-	0.23
15			5.9	10 (leve)	-	0.24
16			7.3	7,006	7	5.74

[1] Sismo de Diseño
[2] Sismo de Seguridad Limitada
[3] Sismo del Umbral de Daño

BDP: Billones de pesos.

Ilustración 1.Escenarios de riesgo sísmico de Bogotá
Fuente: (Bogotá, 2018)

Pero como ya se ha comentado anteriormente, los planes de respuesta ante desastres sísmicos tienen como primera medida la evaluación del daño causado, limitando la respuesta a un tema netamente de infraestructura y dejando en menos los factores secundarios que conforman la curva de recuperación de un territorio, si no se estudia el tema de la resiliencia ante eventos sísmicos de diseño en Bogotá, la respuesta ante la materialización del riesgo desde el gobierno continuará manteniendo un modo de respuesta ante el desastre y no de gestión del riesgo que contemple integralmente las características del entorno propio de cada UPL.

Una vez evaluada la capacidad de resiliencia para la UPL objeto de estudio, se puede plantear una metodología de diagnóstico que sea extrapolable a otras UPL o unidades de gestión territorial en otros lugares, de modo que se pueda contribuir a un cambio de enfoque

en la gestión de desastres que se tiene actualmente en Bogotá, permitiendo que las decisiones se tomen basados en parámetros de gestión de riesgos y no de respuesta ante desastres, y de ese modo se vean reducidos los daños y el tiempo de recuperación que sufren las zonas ante eventos sísmicos de diseño.

Un estudio de la capacidad de resiliencia ante eventos sísmicos de diseño en la ciudad de Bogotá abre la puerta para plantear un enfoque de gestión de riesgos que se anticipe al evento y que tenga una visión holística del escenario de daño posterior a un sismo, expandiendo el análisis desde uno que considera puramente la infraestructura hacia uno que considere también los factores socioeconómicos, políticos y de sensibilización de las comunidades haciendo frente a el carácter actual de la gestión de riesgo sísmico que podría plantearse como reduccionista según lo indicado por (Cardona O. D., 2009), cumpliendo con lo estipulado en el reglamento NSR-10 y la formulación de planes de respuesta posteriores al evento que estén enfocados en la evaluación de daño físico de infraestructura. Esta visión ignora la naturaleza hipercompleja del sistema que ya se describió anteriormente, teniendo la posibilidad de derivar en una gestión no optimizada de los activos en la gestión territorial

3.3 JUSTIFICACIÓN

A nivel internacional se ha encontrado abundante literatura que hace análisis de resiliencia para edificaciones aisladas, ciudades de tamaño considerable pero analizadas como una unidad y bajo unos pocos factores de análisis, redes de líneas vitales, entre otros, que componen las unidades urbanas pero encontrar bibliografía que haga un análisis integral de un área urbana considerando sus componentes es mucho menos frecuente, debido a la evaluación de resiliencia bajo metodologías más detalladas que aumentan la complejidad del análisis añadiendo incertidumbre a las mediciones, conclusiones y posibles usos de las investigaciones, de modo que la inmersión en esta metodología desembocará en una ampliación del conocimiento existente y el descubrimiento de nuevas explicaciones que enriquezcan la comprensión de estos análisis.

Mediante esta investigación se pretende establecer un aporte metodológico que consiste en la integración de lógica difusa con los factores cuantitativos y cualitativos derivados del

análisis territorial que toma como base las 4 R definidas por (Bruneau & Chang, 2003) como propiedades de la resiliencia, que establezca una base para estudios de profundización dentro de cada aspecto planteado, que pueda ser usado en el futuro tanto la aquí planteada como las metodologías derivadas de la profundización de estudio en sus componentes en diferentes territorios, adaptando los componentes propios de sus territorios para obtener diagnósticos que sean útiles en la gestión territorial, pero adaptados a las condiciones propias que, dentro de, dentro del territorio nacional, tienen amplias variaciones geográficas, de clima, e dinámicas económicas, entre otras. De esta manera se espera fortalecer el campo de investigación de análisis de riesgos sísmicos para la gestión territorial en áreas urbanas vulnerables, contribuyendo a la solución de problemas concretos que afectan a las comunidades urbanas, especialmente en Bogotá; dado el crecimiento descontrolado, informal y ausente de normativa técnica que garantice cuando menos, la resistencia de las edificaciones tras un evento disruptivo. Se espera también identificar áreas de mejora en la gestión del riesgo sísmico y proporcionar recomendaciones que puedan ser implementadas para reducir los impactos de futuros eventos sísmicos de diseño y acelerar la recuperación de las comunidades afectadas y que los resultados de esta investigación tengan un impacto positivo en la planificación urbana y en la formulación de políticas de gestión del riesgo en la ciudad.

Este enfoque dirigido hacia poblaciones vulnerables encuentra su razón de ser en los asentamientos existentes que presentan condiciones de riesgo y que requieren una mayor atención por parte de las entidades gubernamentales. En ese sentido, se pretende un avance en términos de caracterización territorial y prevención de desastres.

Ahora bien, como ya se mencionó, la resiliencia no es un concepto aislado, se nutre de otros avances, los estudia, analiza e integra con el propósito de cuantificar las variables más representativas de un sistema, y para efectos de esta investigación, determinar un índice que haya contemplado todas las variables relevantes, dándole a la metodología la posibilidad de hacer un diagnóstico conciso pero respaldado por la complejidad misma del análisis. En esta investigación se utilizaron todas las variables relevantes aplicables al entorno urbano de la ciudad. Haciendo hincapié en las simulaciones dinámicas del suelo a través del uso de la información recopilada por la Red de Acelerógrafos de Bogotá.

Lo que se pretende obtener con este ejercicio, es implementar por primera vez un análisis destinado a una unidad del territorio urbano, en este caso una Unidad de Planeamiento Local, caracterizarla y con ello, poder emitir recomendaciones que sirvan para robustecer los planes de gestión del riesgo.

Este trabajo también se justifica porque aborda un tema que tiene poco desarrollo en la bibliografía a nivel nacional cuando se habla de una escala urbana específica. Aunque en el país existen estudios importantes sobre amenaza sísmica, microzonificación, diseño sismorresistente y gestión del riesgo, estos estudios tienen un alcance limitado a evaluaciones físicas del daño y pérdidas económicas sin estimar niveles de desempeño global en función del tiempo para poder plantear términos como “tiempo de recuperación”. En ese sentido, esta investigación puede considerarse uno de los primeros acercamientos a la evaluación de la resiliencia sísmica en unidades urbanas de Colombia, ya que propone una lectura territorial de la UPL a partir de sus condiciones físicas, funcionales, sociales e institucionales; por esto, además de presentar el estudio de caso, como ya se comentó, deja una base metodológica que podría ajustarse y aplicarse en otros sectores de Bogotá o en ciudades con problemáticas similares.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 ESTADO DEL ARTE

La construcción del marco de referencia tuvo como apoyo las bases de datos académicas suministradas por la universidad (EBSCO, ScienceDirect, Scopus, Web of Science), en conjunto con datos abiertos (Google Scholar) y artículos de bases de datos de instituciones externas a las que se obtuvo acceso mediante círculos profesionales adicionales a los que los autores han tenido acceso (ASCE). El algoritmo de búsqueda consistió en la búsqueda de conceptos clave en las bases de datos ya mencionadas, directamente mediante el uso de palabras clave como “resiliencia sísmica”, “resiliencia urbana”, “resiliencia y lógica difusa”, “resiliencia en líneas vitales”, “Resiliencia en ingeniería civil”, “Resiliencia en edificaciones”.

Una vez obtenido el grupo de referencias bibliográficas, se aplicó un cribado rápido mediante la lectura de títulos, resúmenes y conclusiones para verificar qué tan alienados estaban los textos con el propósito del capítulo de estado del arte. Luego se gestionaron los artículos mediante una metodología de tres capas: Almacenamiento, gestión y nota: El almacenamiento y las notas se gestionaron mediante los softwares Zotero y Obsidian, para añadir notas derivadas de la lectura del resumen, rotular tablas o gráficos que pudieran resultar útiles en el desarrollo del trabajo, y armar un esquema de nodos que permitiera interrelacionar las ideas principales contenidas en algunos grupos de bibliografía. Debido a la fase de cribado rápido inicial, no se determinó el número inicial de documentos obtenidos (el número mayor vino de la primera metodología de consulta en las bases de datos académicas) pero el resultado final permitió el uso de más de 55 referencias entre bibliográficas y normativas en el desarrollo del documento.

El término resiliencia tiene remonta sus orígenes académicos hasta 1807, donde Thomas Young introdujo una noción de la elasticidad en el tratado “A course of lectures on natural Philosophy and the mechanical Arts” como primera aproximación implícita a la resiliencia.

Su posterior uso dentro del ámbito de investigación ha cruzado las ciencias de materiales, ecología, psicología y humanidades para empezar a ser incorporada en la ingeniería después de los mega desastres ocurridos durante la década de 1990 e inicios del 2000.

En el año 2003, (Bruneau & Chang, 2003) presentaron el documento fundacional sobre resiliencia sísmica de comunidades, allí se presentan 4 propiedades y 4 dimensiones que describen el desempeño de un sistema en un instante determinado. Este documento es fundacional en el tema, sentando las bases para el desarrollo de análisis de resiliencia dentro de la ingeniería estructural, ingeniería detrás de las líneas vitales, redes viales, entre otros, y de él se han derivado, entre muchas investigaciones, la que se desarrolla en este documento.

(LU & LIAO, 2020) publicaron una investigación que revisó varios estudios de ingeniería civil para presentar un marco y unas especificaciones para la cuantificación de la resiliencia ante desastres de sistemas sometidos a sismos y otros desastres inesperados. Allí se revisan y discuten los métodos aplicados a ciudades y subsistemas derivados en varios estudios de caso. Allí se concluye que la mayoría de la bibliografía estudiada se centra en un solo subsistema individual descuidando los efectos combinados de los subsistemas ante varios tipos de desastre.

Las modificaciones al enfoque de Bruneau han tomado en cuenta las herramientas de procesamiento de datos y la concepción de las ciudades como sistemas de alta complejidad para establecer marcos de evaluación de resiliencia urbana teniendo en cuenta la interdependencia de componentes en sistemas multi-estructura. (Bristow & Hay, 2017) presentó la generación de matrices de interdependencia como un insumo sobre el que se generan los grafos que muestran las relaciones entre diferentes componentes y permiten estimar el daño conjunto resultante de la falla de un solo elemento a partir de cómo se conecta con otros. Un ejemplo se muestra en la Ilustración 2

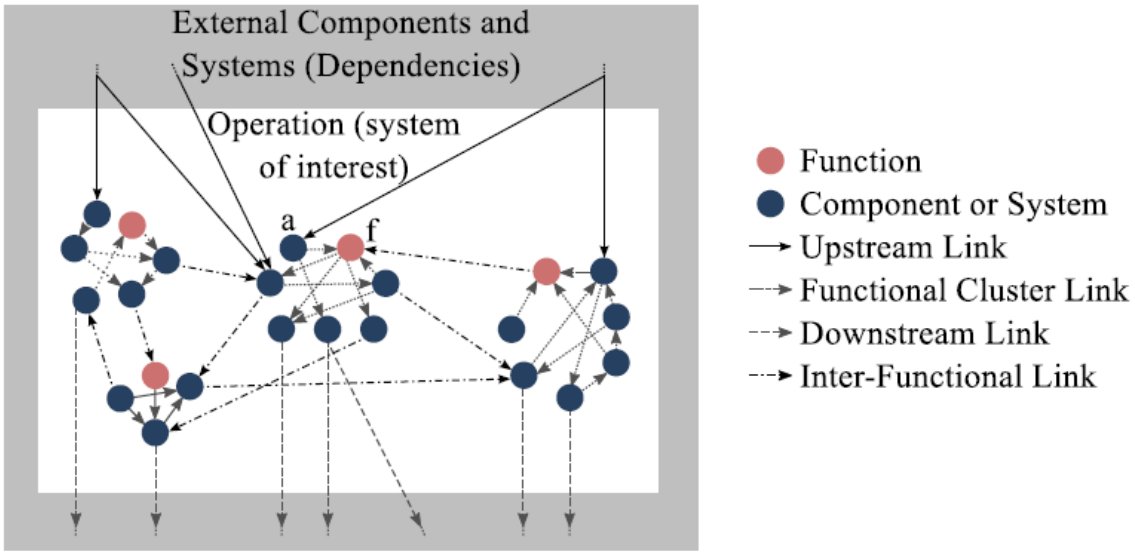


Ilustración 2. Gráfico de la arquitectura de un sistema
los enlaces indican relaciones entre componentes o sistemas externos variables con el estado de cada uno de los componentes y sistemas internos; la punta de flecha indica que ese nodo puede volverse dependiente del nodo de origen (f puede llegar a depender de a)
Fuente: (Bristow & Hay, 2017)

(Zhang, Miller-Hooks, & Denny, 2015) Presentaron una evaluación del papel de la topología de la red en la resiliencia de la red de transporte. Evaluando 17 tipos diferentes de redes y cuantificando mediante operaciones de grafos la resiliencia de las redes en términos de índices de accesibilidad y conectividad, teniendo en cuenta acciones de preparación y recuperación. De allí se obtuvieron diagnósticos de alta resiliencia para las redes con más nodos de conexión redundante y se identificaron las topologías que reducen esta capacidad. Los 17 tipos de red se presentan en la Ilustración 3

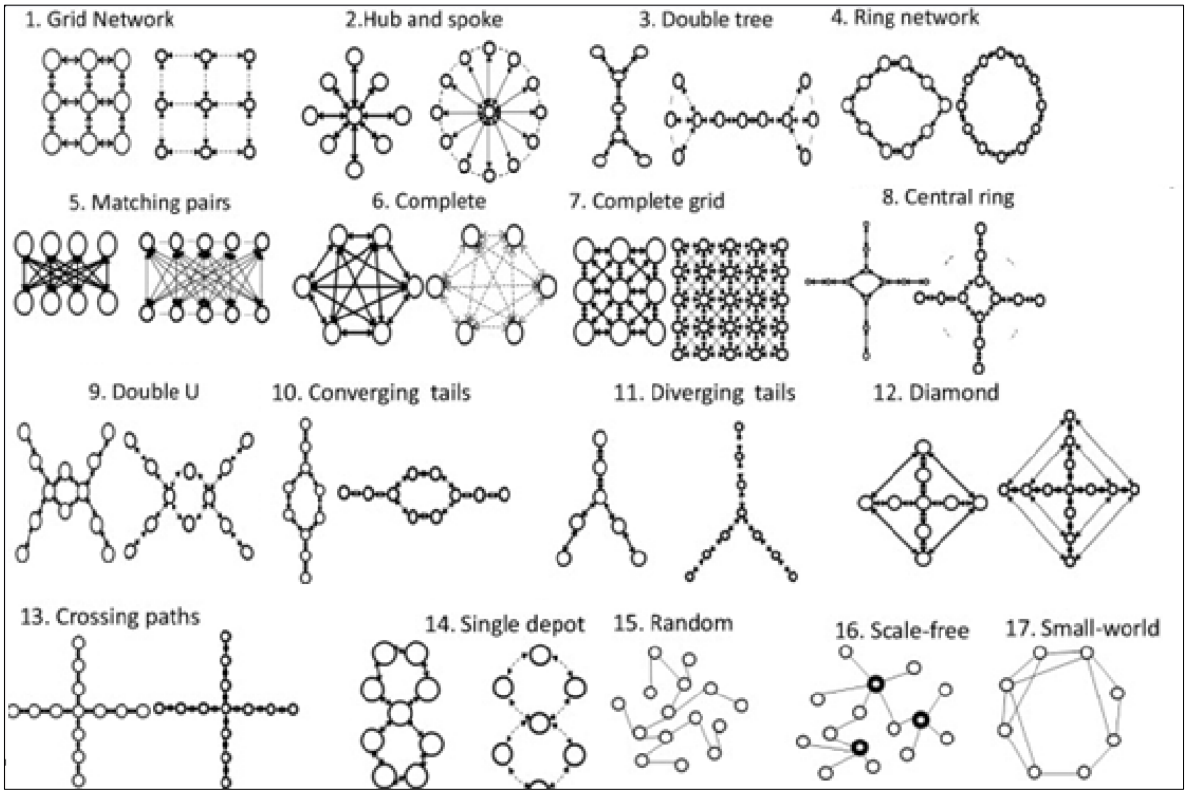


Ilustración 3. Topologías de red para análisis de redundancia
(Fuente: Zhang, 2015)

(Cutter, Burton, & Emrich, 2010), usaron un análisis de capacidades sociales, económicas e institucionales, además de las variables normales de infraestructura, para revisar el comportamiento de la resiliencia en áreas urbanas y rurales, estudiando puntualmente a varios condados del sureste de estados unidos. Allí se encontraron mayores niveles de resiliencia en las áreas urbanas debido a mejores indicadores socioeconómicos.

Durante los últimos años se han venido desarrollando trabajos que tratan la resiliencia. (Cardona, Ordaz, Marulanda, & Barbat, 2008) presentaron un estudio sobre el impacto macroeconómico y la resiliencia ante eventos sísmicos sobre un caso de estudio en el territorio colombiano, allí se habla sobre el índice de déficit de desastres y la capacidad financiera del estado para hacer frente a estas situaciones.

El Fondo de Adaptación (FA) se ha encargado de intervenir estructuras para que sean resilientes (Núñez et al., 2019).

(Yáñez contreras, Amaya Martelo, & Rodríguez Páez, 2020) presentaron un estudio donde se comparan la resiliencia de los departamentos de Colombia para mitigar los efectos de eventos adversos. En este trabajo se analizaron variable como la diversidad de suelos, diversidad de empresas, índice de desempeño integra y la capacidad de carga del ecosistema para calcular un índice de resiliencia.

(Vesga Rojas, 2017) presentaron “Nuevas formas para optimizar la gestión del riesgo desde la perspectiva de territorios resilientes en Colombia”, otro estudio donde se hace una revisión de las propuestas de desarrollo de territorios resilientes, donde se busca dar respuesta a la falencia que existe en el desconocimiento del término, reconociendo la importancia de su implementación según sus principios teóricos y prácticos.

La tesis “Estimación del índice de resiliencia en tres estructuras de contención en la vía Sibaté - Fusagasugá” (Rincón Aguirre & Bonilla Parra, 2021) se enfoca en la obtención, estudio y análisis del índice de resiliencia en muros de contención. En dicho trabajo parten de los parámetros 4R para el análisis de la resiliencia. Además, se estableció que de los cuatro parámetros base del estudio, los más relevantes son la robustez y la redundancia, aunque esta valoración puede deberse a las condiciones propias de las estructuras de contención evaluadas. Luego de determinar el índice de resiliencia se concluyó que el hecho de que una estructura presente una resiliencia óptima antes de un evento abrupto no implica un índice de resiliencia alto. Sin embargo, una limitante de este proceso investigativo fue la ausencia de estudios geotécnicos de la estructura evaluada, complicando el proceso de análisis general del proyecto.

“Estimación del índice de resiliencia para un grupo de estructuras del entorno urbano que pueden verse afectadas por el uso de tecnología trenchless en un sector de la primera línea del metro de Bogotá D.C.” (Gómez Rozo y Benitez Pineda, 2021) otra tesis de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, presenta el estudio del índice de resiliencia en el entorno urbano alrededor del uso de la tecnología Trenchless o sin zanja en el traslado de redes de alcantarillado (en el marco de la primera línea del metro de Bogotá D.C.) derivado de la determinación de los cuatro componentes de la resiliencia en la Ingeniería Civil. Se trabajaron distintos aspectos técnicos, geotécnicos, criterios de sismo resistencia basado en medir los riesgos de desplazamientos en la superficie (subsidencias) debidos a

las prácticas Trenchless y modelarlos mediante el método de elementos finitos, para con ello determinar el índice de resiliencia. Los resultados de la resiliencia menores a 1 evidenciaron un entorno no resiliente y se concluyó que un valor de resiliencia alto o bajo no determina un índice de resiliencia similar. También se predijeron posibles afectaciones en la funcionalidad de la zona y la aparición de subsidencias, debidas a la baja robustez y redundancia en el terreno.

(Gomez, 2026) Desarrolló una metodología integral para cuantificación de resiliencia comunitaria en zonas vulnerables a inundaciones adoptando un marco de resiliencia comunitaria de 6 R, combinando evaluación multicriterio con el criterio de expertos, mediante un análisis jerárquico de procesos. Esto a su vez se combina con herramientas de estadística descriptiva en aras de cuantificar percepciones comunitarias y definir limitantes transitorios y potenciadores de la resiliencia comunitaria.

(Pineda & Larrañaga, 2022), (Pineda, Larrañaga, & Carmona, 2024), (Pineda, Larrañaga-Rubio, & González-Pérez, 2025) y (DELGADO, 2023) presentaron estudios sobre el índice de resiliencia para diferentes sistemas cerca o dentro de la ciudad de Bogotá. Las formulaciones tienen en común la construcción del índice partiendo de las propiedades de resiliencia definidas según (Bruneau & Chang, 2003): Robustez, Redundancia, Recursos de recuperación y rapidez de recuperación, y aunque los sistemas estudiados son del componente Geotécnico (Excavaciones profundas para cimentaciones y retención de tierras en sistemas viales) la caracterización de los componentes estudiados tiene cabida dentro de las 4 propiedades ya mencionadas.

4.2 MARCO ESPACIAL

Por medio del decreto 524 de 09 nov de 2023, “Por medio del cual se reglamentan las unidades de planeamiento local – UPL Arborizadora, Lucero, Rafael Uribe, San Cristóbal, Tunjuelito y Usme entre nubes, que conforman el sector sur oriente y se dictan otras disposiciones” , La alcaldesa mayor de Bogotá por ese entonces, Claudia López presentó la delimitación territorial de la unidad en función de aproximar el ordenamiento territorial a el concepto de la ciudad de los 15 y 30 minutos, que consiste en que los desplazamientos para realizar actividades relacionadas al ocio, el cuidado, la recreación, educación, empleo

y salud no superen los 15 minutos caminando o 30 minutos ya sea en bicicleta o transporte público.

La UPL Tunjuelito abarca 38 barrios y cuenta, según los datos de las proyecciones y retroproyecciones con base en el censo 2018 para los años 2005 -2035, con una población de 173721 habitantes, y 19050 lotes (sin tener en cuenta la propiedad horizontal) que se distribuyen en usos de suelo comercial, residencial institucional, industrial y otros (BOGOTÁ A. M., 2021). La Ilustración 4 presenta una vista aérea satelital de la UPL y una representación de sus límites:

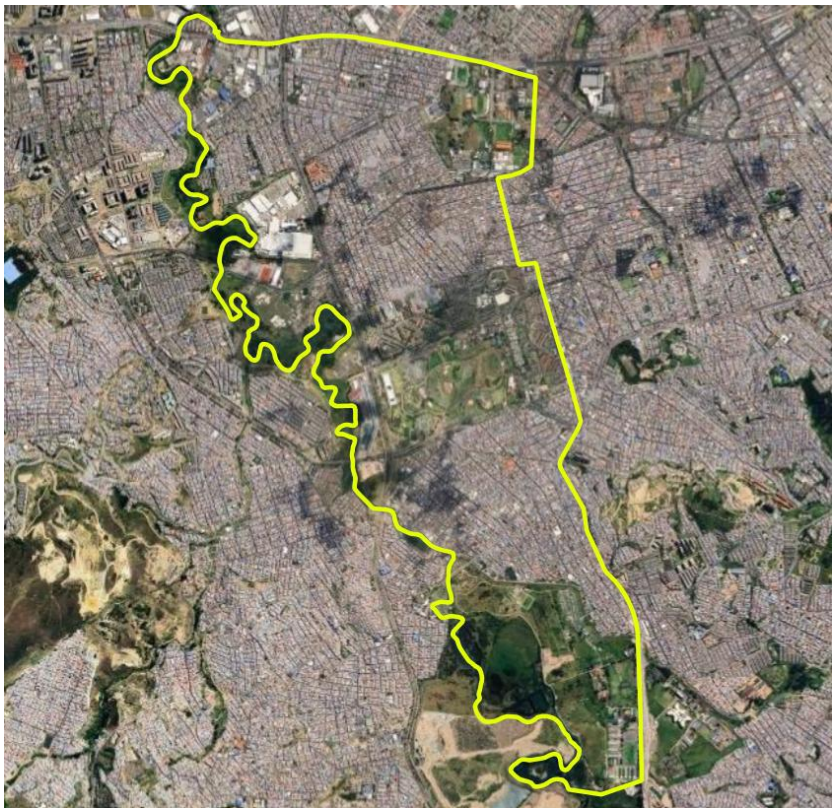


Ilustración 4. UPL Tunjuelito
Fuente: adaptado por autores

“Como punto de partida, es lógico comenzar a analizar la resiliencia centrándose en las organizaciones cuyas funciones son esenciales para el bienestar de la comunidad después de los desastres provocados por sismos. Estas instalaciones críticas incluyeron líneas de agua y electricidad, hospitales de cuidados intensivos y organizaciones que tienen la

responsabilidad de emergencias a nivel de la comunidad local" (Bruneau & Chang, 2003), esto partiendo de la intención de prevalencia de la salud general de la comunidad.

En respuesta a esa definición, se tiene la información relacionada con la infraestructura de categoría crítica que responde a los servicios de acueducto y alcantarillado, cobertura del servicio de salud e instituciones de atención a emergencias, también se tomó en cuenta el concepto de necesidades fisiológicas que constituyen el sustento del bienestar para un individuo, y en este caso, para una comunidad, según lo indicado por (MASLOW, 1943):

La identificación de infraestructura crítica tiene como criterio de selección aquella destinada a cumplir las necesidades primarias de la población, como alimento, hidratación, refugio y eliminación de desechos corporales, de modo que, respondiendo a esa dinámica se consultaron sistemas de información geográfica distrital como datos abiertos Bogotá, mapas Bogotá, movilidad Bogotá, IDECA. Y la Tabla 1 presenta las fuentes consultadas para la información que se detalla en el capítulo 6

Tabla 1. Fuentes de sistemas de información geográfica
Fuente: Autores

Datos geográficos	Fuente
UPL - Equipamiento nuevo tipo polígono. Bogotá D.C	Datos abiertos Bogotá
Unidad de Planeamiento Local. Bogotá D.C	IDECA
Organizaciones Comunales, Bogotá D.C	Datos abiertos Bogotá
Sistema Distrital de Parques y Escenarios Públicos Deportivos.	Datos abiertos Bogotá
Colegios	Datos abiertos Bogotá
Iglesias	Mapas Bogotá
Hospitales	Mapas Bogotá
Estaciones de bomberos	Mapas Bogotá
Estaciones de Policía	Mapas Bogotá
Defensa civil	Mapas Bogotá
Malla Vial Integral Bogotá D.C	Datos abiertos Bogotá
Redes de acueducto	Mapas Bogotá
Pisos por manzana	Mapas Bogotá

4.3 MARCO TEÓRICO

4.3.1 Lógica difusa

La lógica difusa, también llamada teoría de conjuntos difusos, fue desarrollada por el Dr. Lofti Zadeh, iniciando con la publicación del artículo Fuzzy Sets (1965) y que, mediante el desarrollo investigativo ha llevado a la metodología a estar presente en industrias tecnológicas y análisis de sistemas.

(Feltan & Caballero, 2016) presentan la diferencia entre lógica clásica y lógica difusa a partir de su característica más distintiva dentro del contexto del documento: la función de pertenencia. Mientras que la primera asigna pertenencia a una variable dentro de dos valores únicos uno y cero (1 y 0) mediante los que se puede describir la pertenencia a uno o varios conjuntos, la segunda permite que una variable pertenezca a ese mismo o mismos conjuntos, pero con un grado de certeza variable, y sobre esa filosofía se construye todo el universo discursivo de la lógica difusa.

Los conceptos básicos y fundamentales de la lógica difusa son:

- Variables lingüísticas: son las expresiones de sentido común que suelen ser usadas para describir una situación o condición. Este es el punto diferencial de los conjuntos difusos y su articulación con el análisis de variables en función de adaptarse a los grados de pertenencia que adopta un observador en un proceso de clasificación cualitativo. Para ilustrar este punto, (Feltan & Caballero, 2016) presentan un ejemplo un tanque de almacenamiento con una capacidad de 100 m^3 al cual, en términos de variables lingüísticas se le pueden asignar 3 estados que a su vez definen los conjuntos: lleno, medio lleno y vacío. La Ilustración 5 presenta el tanque del ejemplo en la bibliografía y los conjuntos A, B y C que indican los estados posibles del tanque.

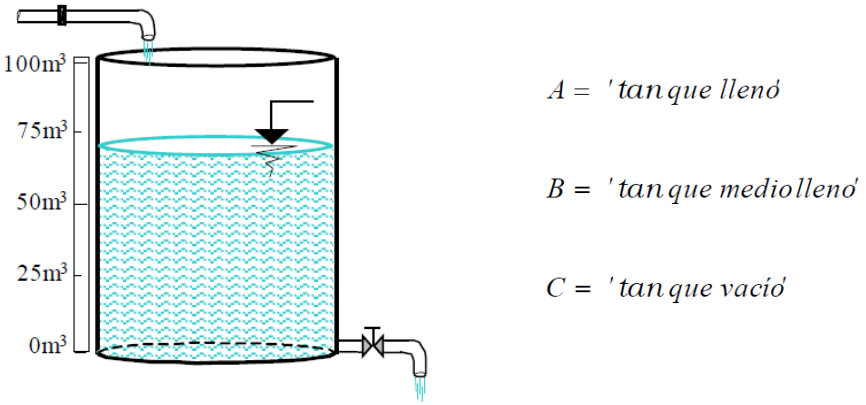


Ilustración 5. Tanque de almacenamiento, ilustración para definición de variables lingüísticas y conjuntos
Fuente: (Feltan & Caballero, 2016)

Bajo este ejemplo se puede decir que el conjunto de valores (U) que puede adoptar la variable que representa el volumen dentro del tanque (x) se describe así: $U[0{,}100\ m^3]$. Si se representan los conjuntos mediante el uso de la lógica tradicional se pueden presentar mediante las siguientes expresiones:

$$A_c = \{x \in U | x = 100m^3\}$$
$$B_c = \{x \in U | x = 50m^3\}$$
$$C_c = \{x \in U | x = 0m^3\}$$

El subíndice c indica que los conjuntos se definen bajo la lógica clásica o tradicional. De allí resalta el hecho de que cada conjunto tiene un solo elemento, de modo que, siendo absolutamente estrictos, solo hay 3 instantes en los que se puede describir el volumen del tanque, y dentro de un sistema dinámico eso no es viable porque la mayoría del tiempo no se puede tener un valor claro para la lectura del tanque.

Cabe resaltar que en un caso de la vida real la medida que se usa para el tanque es la numérica que indica, según la precisión de la medida, el volumen exacto contenido en el tanque, entonces la descripción de los tres conjuntos sirve como referencia de la adaptación de clasificaciones cuantitativas cuando no existe o no se cuenta con un control estricto y/o numérico.

- Función de pertenencia: “es una relación, que asocia cada elemento de u conjunto difuso con el grado de certidumbre de pertenencia a ese conjunto. Estas funciones pueden representarse en forma continua o discreta” (Feltan & Caballero, 2016). Esos grados de pertenencia es una medida de la certeza de que un elemento pertenece a un conjunto difuso asumiendo valores entre 1 y 0. Esos valores no deben de manera probabilística sino como una posibilidad, la Ilustración 6 presenta gráficamente las funciones de membresía del ejemplo. Una posible representación de los conjuntos difusos para el ejemplo del tanque se da mediante las siguientes expresiones:

$$A_d = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\}$$
$$B_d = \{x \in U | \mu_B(x) > 0\}$$
$$C_d = \{x \in U | \mu_C(x) > 0\}$$

Donde μ_A, μ_B, μ_C son las funciones de pertenencia de los tres conjuntos. El subíndice d indica que los conjuntos son difusos.

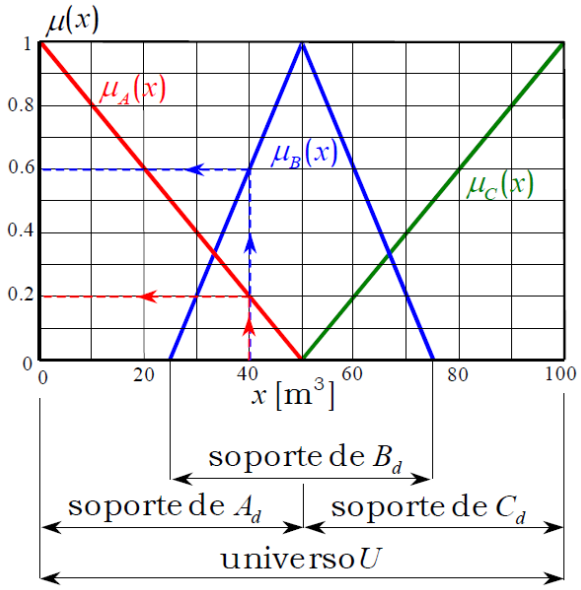


Ilustración 6. Funciones de membresía de los conjuntos difusos A_d, B_d, C_d
Fuente: (Feltan & Caballero, 2016)

Esta lógica permite una asignación para cada valor numérico del volumen dentro del tanque en lugar de las únicas tres clasificaciones vistas en la lógica clásica.

- El dominio del conjunto: es aquel que contiene todos los elementos para los cuales la función de pertenencia es mayor que cero. Las expresiones que lo representan son las siguientes:

$$Dom(A_d) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} = [50m^3, 100m^3]$$
$$Dom(B_d) = \{x \in U | \mu_B(x) > 0\} = [25m^3, 50m^3]$$
$$Dom(C_d) = \{x \in U | \mu_C(x) > 0\} = [0m^3, 50m^3]$$

  De lo indicado en las expresiones anteriores y en la Ilustración 6 se tiene que el dominio de algunos conjuntos es común, pero debe aclararse que no es una regla general en la determinación de conjuntos difusos. Siempre que el grado de pertenencia oscile entre 1 y 0 para la certeza y la incertidumbre totales respectivamente, entonces la forma de la función es libre. Las formas triangulares (como las presentadas en la Ilustración 6, trapezoidales o gaussianas suelen ser las más usadas por ajustarse al comportamiento de las variables en la vida real)

- El corte del conjunto: es un conjunto que contiene los elementos con un grado de pertenencia mayor a una referencia indicada en el mismo nombre del conjunto, se representa mediante el símbolo α.
- La altura del conjunto: es la medida más alta que alcanza su función de pertenencia.

4.3.2 Análisis de grafos aplicado a redes

Como se presentó en el estado del arte (numeral 4.1), (Zhang, Miller-Hooks, & Denny, 2015) Presentaron una evaluación del papel de la topología de la red en la resiliencia de redes de transporte, pero aplicando análisis de grafos bajo la premisa de que la capacidad de respuesta del sistema ante un evento disruptivo se mide a través de su capacidad para resistir y absorber el desastre mediante **redundancias** y capacidades excedentes. Esta metodología tiene componentes que permiten adaptarla a la información presentada en la Tabla 1

Para el análisis y diagnóstico de la red se hace uso de variables descriptivas que presentan características no visibles de la red cuando esta tiene un tamaño considerable y que indican

propiedades que son similares con redes que ya han sido estudiadas y correlacionarlas, estimando entonces su comportamiento ante eventos disruptivos.

(Kansky & Beauguitte, 1963) definió una serie de variables que permiten describir relaciones estructurales entre los componentes de una red y extraer características de esta, partiendo de las medidas básicas como cantidad de nodos (v) y cantidad de arcos o conectores entre nodos (e), estas variables son retomadas por (Zhang, Miller-Hooks, & Denny, 2015) y se indican a continuación:

- Número ciclomático o número de ciclos: indica el número de circuitos fundamentales de la red. Cuanto más compleja es una red, mayor es el número de ciclos, por lo que puede usarse como indicador del nivel de desarrollo y complejidad de un sistema. La expresión que lo define es:

  $$\mu = e - v + G$$

  Donde:
  μ: número ciclomático
  e: número de arcos o conectores
  v: número de nodos en la red
  G: número de sub-grafos dentro de la red

- Índice alfa (α): es una medida de conectividad que evalúa el número de ciclos dentro de un subgrafo en comparación con el número máximo de ciclos dentro de la red. Cuanto mayor sea el índice alfa, más conectada estará una red. Los árboles y las redes simples tendrán un valor de 0. Un valor de 1 indica una red completamente conectada. Mide el nivel de conectividad independientemente del número de nodos. Es muy raro que una red tenga un valor alfa de 1, porque esto implicaría redundancias muy graves. Este índice también se denomina coeficiente de Meshedness en la literatura sobre redes planas.

  $$\alpha = \frac{\mu}{2v - 5}$$

- Índice Beta (β): Mide el nivel de conectividad en un gráfico y se expresa por la relación entre el número de arcos sobre el número de nodos. Los árboles (sucesión de nodos conectados por un solo enlace) y las redes simples tienen un valor Beta

inferior a uno. Una red conectada con un ciclo tiene un valor de 1. Las redes más complejas tienen un valor superior a 1. En una red con un número fijo de nodos, cuanto mayor sea el número de enlaces, mayor será el número de rutas posibles en la red. Las redes complejas tienen un alto valor de Beta.

$$\beta = \frac{e}{v}$$

- Índice Gamma (γ): Es una medida de conectividad que considera la relación entre el número de arcos observados y el número de nodos en toda la red. El valor de este índice está entre 0 y 1, donde un valor de 1 indica una red completamente conectada (valor poco probable porque describe una red idealizada que no suele encontrarse en la realidad) es equivalente al grado promedio d. La expresión que lo describe es:

$$\gamma = \frac{e}{3(v-2)}$$

- Grado promedio (d): indica el valor promedio de conexiones que tiene un nodo dentro de la red, siendo un indicador de qué tan conectada está la red sin importar los casos individuales de cada nodo. La expresión que lo define es:

$$d = \frac{\sum_i n_i}{v}$$

- Ciclicidad (C) : evalúa la tendencia de un proceso de caminata aleatoria (que es un recorrido entre dos nodos aleatorios del grafo) a generar bucles cerrados o a volver a visitar nodos que ya se recorrieron. Esta variable tiene rangos entre 0 y 1, en donde 0 indica una red de rápida dispersión desde el punto inicial, mientras que valores cercanos a 1 indica topologías densas y de alta conectividad con mucha recurrencia en los caminos que podrían recorrerla. La expresión que la define es la siguiente:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{n} Ciclo_i}{|R|}$$

Donde:

$Ciclo_i$: Es una variable que adopta valores de 1 si la i-ésima caminata formó un ciclo (retornó a un nodo ya transitado) y de 0 en caso contrario

$\sum_{i=1}^{n} Ciclo_i$: número total de caminatas aleatorias que cerraron al menos un ciclo

R: Número total de caminatas o recorridos aleatorios exploratorios sobre la red

- Diámetro: Es la longitud del camino más corto entre los nodos más lejanos dentro de la red, mide la extensión de una red y la longitud topológica entre dos nodos en términos de enlaces o arcos.

4.3.3 Resiliencia en ingeniería

En el año 2003, el centro multidisciplinario de investigación de ingeniería sísmica (MCEER por sus siglas en inglés), de la universidad de Buffalo, publicó el artículo (A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities.), documento que presenta un marco conceptual para definir la resiliencia ante eventos sísmicos de diseño de las comunidades. Allí se presenta una definición de lo que se denomina (Seismic Resilience) como la capacidad de una "unidad social" ya sea comunidad u organización, para mitigar peligros y contener los efectos del evento sísmico, llevando a cabo actividades de recuperación de manera que se minimicen los efectos sociales, pero también se prevengan los daños en eventos sísmicos venideros.

Este documento cuantifica el concepto de resiliencia como una medida del desempeño real o potencial de un sistema dentro de espacio multidimensional y presenta gráficamente la definición, como se muestra en la Ilustración 7:

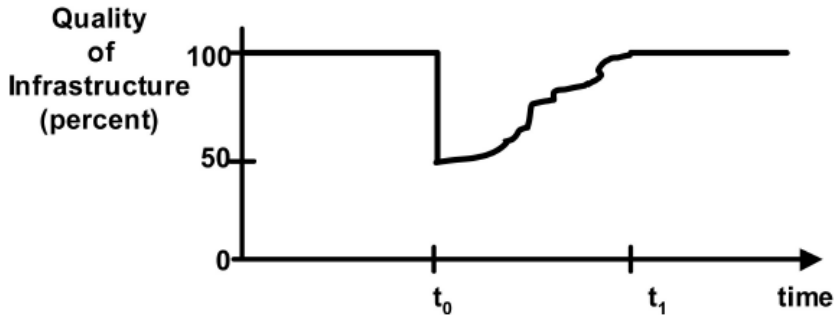


Ilustración 7. Medidas de resiliencia ante eventos sísmicos

Fuente: (Bruneau & Chang, 2003)

El documento presenta niveles de desempeño para t_0 (frontera entre el desempeño inicial y la pérdida de este, ocasionada por el evento sísmico, también llamado evento disruptivo) y t_1 (instante donde se alcanza el desempeño de recuperación del sistema), mostrando una recuperación entre t_0 y t_1. El marco de análisis se basa en tres medidas complementarias de resiliencia: "Reducción de las probabilidades de fracaso", "Reducción de las consecuencias de los fracasos" y "Reducción del tiempo de recuperación". También incluyó medidas cuantitativas de las 4 propiedades de la resiliencia (mismas sobre las que se desarrolla esta investigación): Robustez, Rapidez de recuperación, Recursos de recuperación y Redundancia del sistema, e integra esas medidas en las cuatro dimensiones de la resiliencia ante eventos sísmicos — técnica, organizativa, social y económica.

- Robustez: Es la fuerza o capacidad de los elementos, sistemas u otras unidades analizadas para soportar un determinado nivel de demanda sin sufrir degradación o pérdida de su función

- Redundancia: indica el grado en que existen elementos, sistemas u otras unidades de análisis que sean sustituibles, es decir, capaces de satisfacer los requisitos funcionales en caso de interrupción, degradación o perdida de funcionalidad

- Ingenio (Resourcefulness) o capacidad de gestión: Es la capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos cuando existen condiciones que amenazan con perturbar algún elemento, sistema u otra unidad analizada. El ingenio puede conceptualizarse además como la capacidad de aplicar recursos materiales (monetarios, físicos, tecnológicos e informativos) y humanos para cumplir las prioridades establecidas y alcanzar las metas de gestión

- Rapidez (respuesta): Es la capacidad de cumplir con las prioridades y alcanzar objetivos de manera oportuna para contener pérdidas y evitar disrupciones futuras

“Los estudios sobre resiliencia comprenden métodos de evaluación cualitativos y cuantitativos para evaluar la solidez y estrategias para mejorar la resiliencia (es decir, la

capacidad de recuperación rápida). Entre los estudios sobre resiliencia ante desastres, los desastres considerados incluyeron terremotos, huracán, inundación, y fuego. Los campos de investigación incluyen ingeniería, sociedad y economía, y los niveles de estudio cubren los niveles de ciudad, comunidad, subsistema y edificio. Por lo tanto, es evidente que existe una amplia gama de estudios relacionados con la resiliencia. Además, los estudios sobre evaluación de la resiliencia ante eventos sísmicos en ingeniería civil son más comunes y las aplicaciones correspondientes son relativamente maduras, como el informe de San Francisco Planning and Urban Research y la Iniciativa de Diseño Sísmico Basada en la Resiliencia para la Próxima Generación de Edificios sistema de calificación. Por ello, en este estudio se revisan los avances logrados en la cuantificación de la resiliencia ante terremotos y otros desastres en la ingeniería civil" (LU & LIAO, 2020).

4.3.3.1 Resiliencia y la gestión de riesgo en la Ingeniería Civil

Conforme la resiliencia ha sido estudiada se ha identificado la importancia de conocer la capacidad de un sistema antes de que ocurra un evento disruptivo, para predecir la respuesta que se tendrá antes un peligro y no solo cuando se materializa. Por lo anterior, se relaciona la resiliencia con los conceptos de riesgo y amenaza, los cuales permiten crear planes de acción ante una catástrofe y de esta forma reducir la cantidad de pérdidas generadas, en la Ilustración 8, se muestra la relación de riesgo con las pérdidas después de un evento disruptivo: los huecos son generados por los fallos no corregidos en el sistema lo que causa que el peligro inminente genere pérdidas en los procesos, estas pérdidas pueden ser reducidas analizando conceptos como la resiliencia.

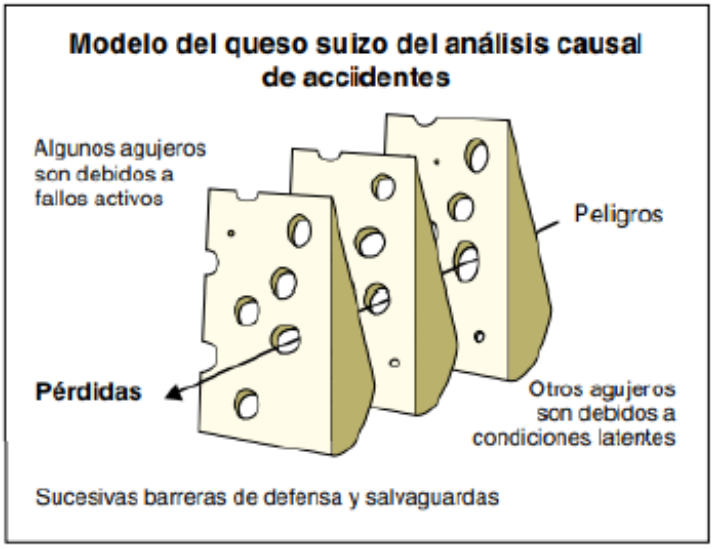


Ilustración 8. Modelo de causalidad (queso suizo) para la gestión de riesgos
Fuente: (ROMERO & BELLOVI, 2018)

La robustez, la redundancia, la capacidad de gestión y la recuperación se pueden relacionar con factores de la gestión de riesgos como la amenaza y la vulnerabilidad, según se muestra en la Ilustración 9.

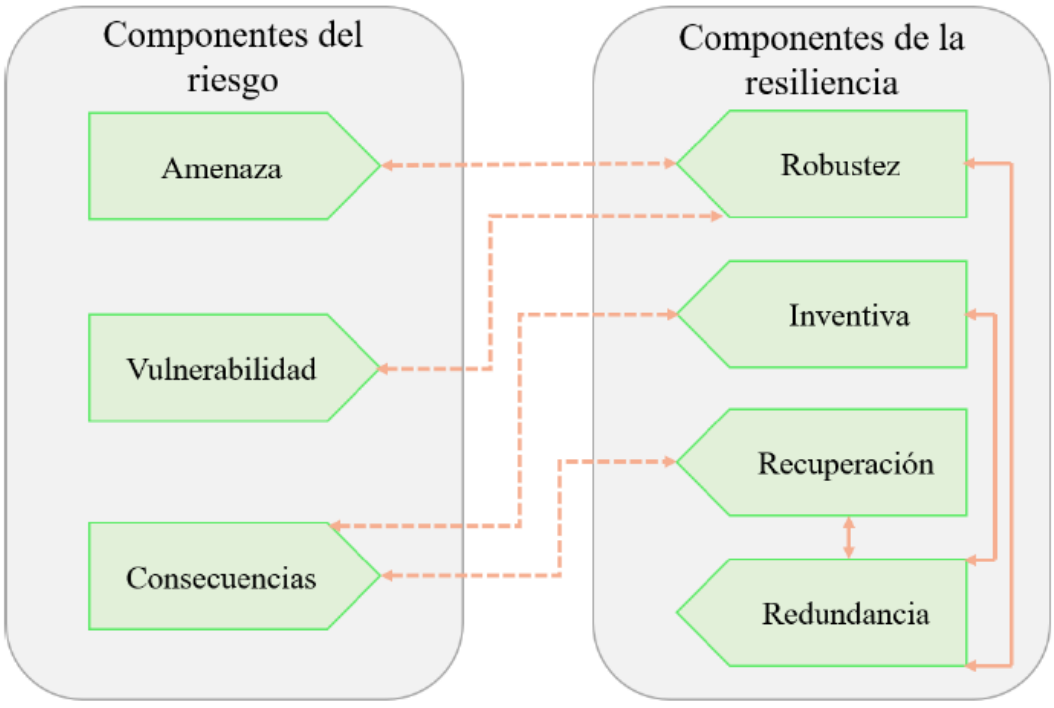


Ilustración 9. Relación entre los componentes de gestión de riesgo y los factores de la resiliencia en la Ingeniería Civil
Fuente: (Rincón Aguirre & Bonilla Parra, 2021)

Esta visión de aprendizaje se ha unificado con la presencia de eventos naturales de gran magnitud de la última década (eventos de México en 2005, Chile en 2010 y Japón en 2011), en donde se ha evidenciado que a pesar de que no se pueda retener un fenómeno natural, es posible reducir los daños provocados por los mismos en la infraestructura, incrementando la resiliencia de estas. Desde allí, algunos países en Sudamérica han comenzado a estudiar y analizar programas ingenieriles basados en la resiliencia, obteniendo edificaciones sostenibles y mejorando, a su vez, el desarrollo de las ciudades, esta relación se evidencia en la Ilustración 10, que permite identificar el comportamiento de una estructura resiliente contra una que no lo es y cómo la resiliencia de una ciudad afecta directamente al desarrollo de esta.

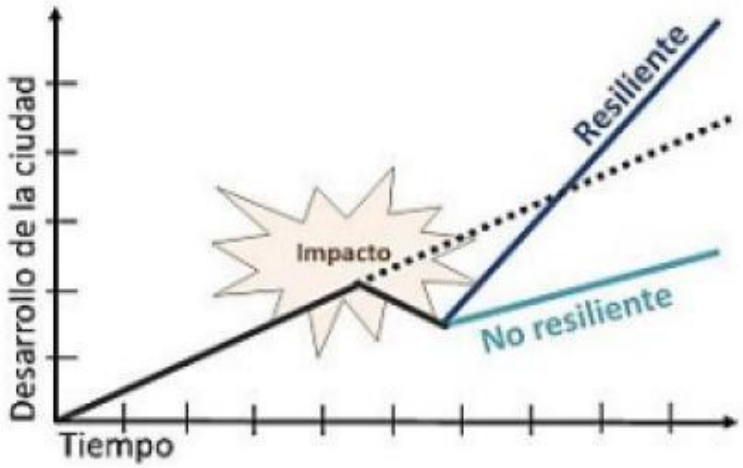


Ilustración 10. Tiempo vs Desarrollo de una ciudad resiliente y una ciudad no resiliente
Fuente: (Iñiguez Siguenza, 2017)

El artículo (Propuesta de un programa de mejoramiento de resiliencia para una ciudad tipo en la Península de Yucatán) (Dominguez & Ibrahimbegovic, 2013) discute sobre la importancia de anexar la resiliencia al proceso de análisis y diseño en la ingeniería estructural integrando una visión ingeniería-gobierno-comunidad para de esta forma recuperar la vida ordinaria luego de un evento extremo, dando cabida a lo que denominan un programa de mejoramiento de la resiliencia para una localidad, dentro de la cual los

miembros de la comunidad puedan participar activamente con las autoridades y especialistas para asegurar la rápida recuperación en las múltiples áreas de estudio de una zona afectada

4.3.3.2 Microzonificación sísmica de Bogotá

La microzonificación de Bogotá se adoptó mediante el decreto 523 del 16 de diciembre de 2010 conforme lo requerido por la NSR-10 y es de obligatoria aplicación, por tanto, se procede a analizar la información que le acude a la UPL de análisis, como se evidencia en la Ilustración 11.

La microzonificación sísmica puede definirse como el conjunto de estudios que tienen como objetivo identificar áreas homogéneas con respecto a la intensidad de la sacudida del suelo y los fenómenos de inestabilidad del terreno inducidos en el sitio por la propagación de ondas sísmicas (VESSIA, LAURENZANO, & PAGLIAROLI, 2021)

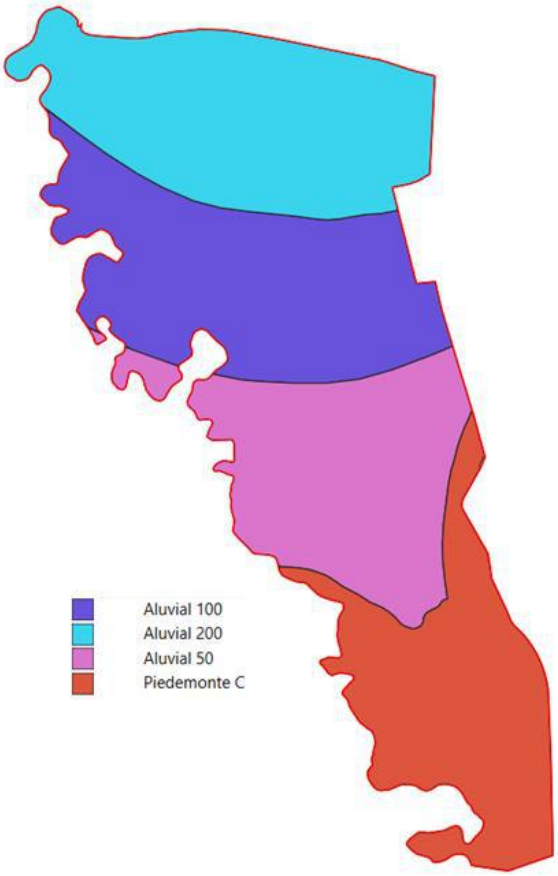


Ilustración 11. Microzonificación sísmica Bogotá de la UPL Tunjuelito
Fuente: Mapas Bogotá

Perfil de suelo

El perfil de suelo es determinado por el ingeniero geotécnico mediante un estudio de geotécnico. Para el presente documento se estudian los perfiles de suelo aplicables a la UPL Tunjuelito como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Perfiles de suelo UPL Tunjuelito
Fuente: (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), 2010)

Zona	Espesor deposito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Descripción geotécnica general	Velocidad de onda promedio 50 m Vs (m/s)	Humedad promedio 50 m Hn (%)	Efectos de sitio relacionados
Piedemonte C	<50	0.3-0.6	Suelos coluvial y aluvial con espesor superior a 12 m: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosas	300-750	10-30	Topográfico, ampliación
Aluvial 50	<50	0.4-0.8	Suelo Aluvial duro: Arcillas limosas o arenas arcillosas, en algunos sectores se encuentran lentes de arenas limpias	175-300	25-50	Amplificación, licuefacción
Aluvial 100	50-100	0.8-1.2				
Aluvial 200	100-200	1.2-2.5				

Efectos locales

Los efectos locales para los perfiles de suelo aplicables a la UPL se toman en cuenta para los espectros de seguridad limitada empleado en la evaluación e intervención de estructuras existentes conforme el Título A.10 de la NSR-10, ya que el fin del presente documento es determinar la resiliencia actual de la UPL, por lo cual estos corresponden al detalle presentado en la

Tabla 3:

Tabla 3 Efectos locales UPL Tunjuelito
Fuente: (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), 2010)

Zona	Fa	Fv	Tc (s)	Tl (s)	A_e (g)
Piedemonte C	1.85	1.95	0.51	3.0	0.22
Aluvial 50	1.40	2.10	0.72	3.5	0.18
Aluvial 100	1.25	2.50	0.96	3.5	0.16
Aluvial 200	1.10	2.50	1.09	3.5	0.14

Aceleraciones

La aceleración horizontal pico efectiva de seguridad limitada A_e corresponde a 0.13g

Espectro de aceleración microzonificación sísmica

El espectro de aceleración se utilizó como una herramienta para entender cómo podría responder el territorio ante un sismo, teniendo en cuenta que las edificaciones no reaccionan todas de la misma manera. La respuesta de una estructura depende de varios aspectos, como su altura, rigidez, masa, sistema estructural y periodo de vibración. Por eso, un sismo no afecta igual a una edificación baja que a una edificación más alta o flexible.

En este sentido, el espectro de aceleración permite relacionar el periodo de vibración de una estructura con la aceleración que podría experimentar durante un evento sísmico. A diferencia de la aceleración máxima del terreno, que corresponde a un valor puntual del movimiento del suelo, el espectro muestra la demanda esperada para diferentes tipos de estructuras, lo cual es importante porque una edificación puede amplificar el movimiento del suelo dependiendo de sus características propias y de las condiciones del terreno donde se encuentra.

De acuerdo con la microzonificación sísmica de Bogotá, para la zona de estudio se tomó una aceleración horizontal pico efectiva de seguridad limitada, Ae, de 0,13 g. Con este valor se revisaron los espectros correspondientes a las zonas Piedemonte C, Aluvial 50, Aluvial 100 y Aluvial 200, los cuales se muestran en la Ilustración 12.

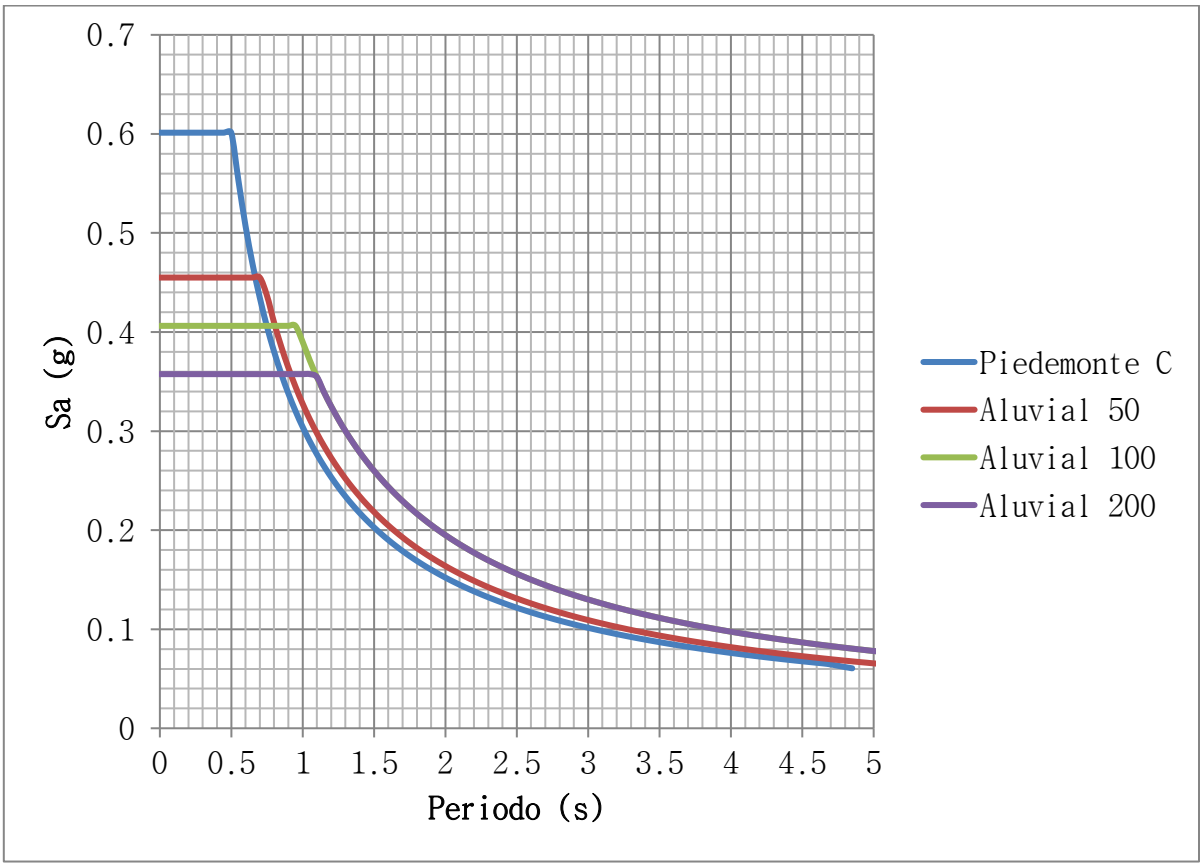


Ilustración 12 Espectro de aceleraciones seguridad limitada
Fuente: Información procesada por autores

Se observa que el sismo el Calvario posee el más alto registro, por tanto, se procede a comparar los datos junto con el sismo el centro y los de microzonificación sísmica

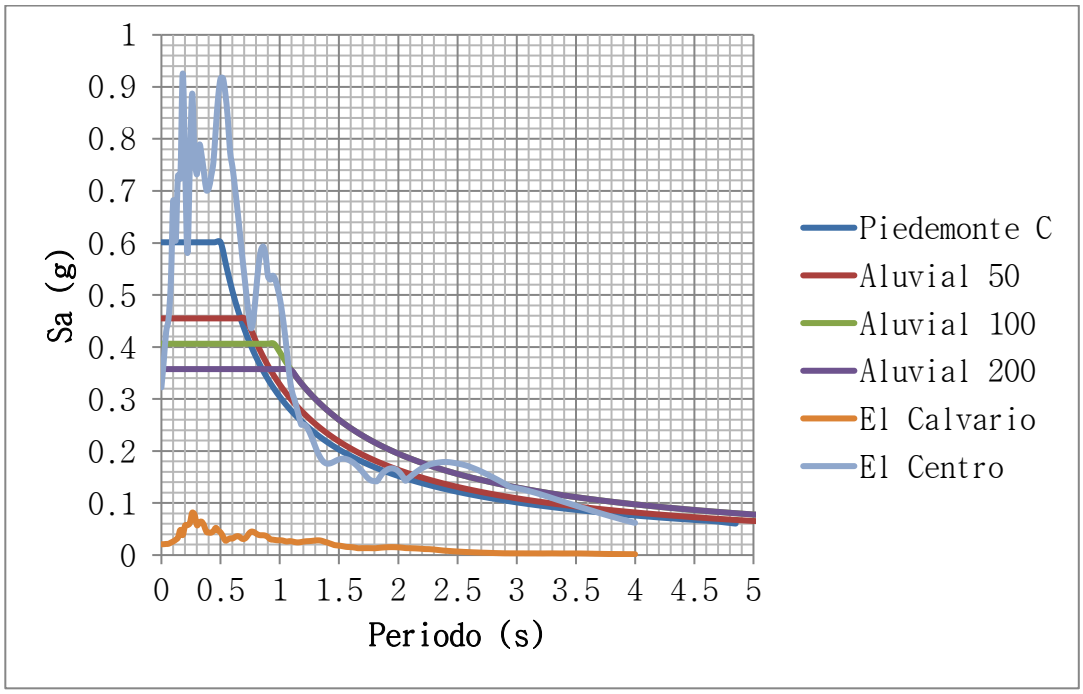


Ilustración 13 Comparación de espectros de aceleración
Fuente: Información procesada por autores

Al analizar la Ilustración 13 se observa que los eventos sísmicos registrados por la red de acelerogramas están por debajo del espectro de aceleraciones de seguridad limitada de la norma empleado para evaluar e intervenir estructuras existentes donde se examina la ductilidad de estas frente a derivas y capacidad de cada uno de los elementos, lo que puede verse en que no se han presentado afectaciones graves que lleven a un colapso o necesidad de intervención integral de una estructura durante los 21 eventos sísmicos registrados. Sin embargo, estos eventos sísmicos pueden generar daños acumulativos que pueden reducir la capacidad del sistema de resistir los sismos de diseño o crear afectaciones mayores en las estructuras que no cumplan lo requerido en la NSR-10

No obstante, al comparar estos valores con el sismo el Centro, el cual registro un pico de aceleraciones en periodos cortos (estructuras de 5 pisos o menos), se analiza que ante sismos fortuitos las estructuras existentes que estén dentro de los rangos normativos de ductilidad en cumplimiento del título A.10 de la NSR-10 podrían presentar daños graves

que puedan generar colapsos y adicionalmente no es posible determinar las consecuencias finales para las estructuras que no cumplan el título ibidem.

Por esta razón, el espectro de aceleración asociado a la microzonificación no se tomó como un dato aislado, sino como un insumo para entender la demanda sísmica esperada en la UPL. A partir de los parámetros definidos para cada zona de respuesta sísmica, fue posible revisar cómo cambia la aceleración espectral según el tipo de suelo, lo cual permitió relacionar las condiciones del subsuelo con la posible afectación de las edificaciones existentes.

Para el análisis se consideró el espectro de seguridad limitada, empleado como referencia para la evaluación de estructuras existentes; este espectro permitió establecer una demanda sísmica de comparación frente a los registros acelerográficos revisados. En el caso de la UPL Tunjuelito, los registros obtenidos en las estaciones cercanas mostraron valores inferiores al espectro de seguridad limitada, lo que indica que los eventos registrados no alcanzaron la demanda sísmica usada como referencia para la evaluación.

Sin embargo, este resultado no significa que el territorio no presente riesgo. Más bien, indica que los sismos registrados hasta el momento fueron menores que el escenario de análisis considerado. Por eso, el espectro de aceleración se utilizó como una aproximación técnica para valorar la robustez física del territorio frente a un evento sísmico más exigente.

5. METODOLOGÍA

5.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta el procedimiento seguido para estimar la capacidad de resiliencia ante eventos sísmicos de la UPL Tunjuelito a partir de la información territorial disponible y de los factores de resiliencia presentados en el marco de referencia, con el fin de organizar las variables que permiten analizar el comportamiento del territorio frente a un evento sísmico.

Para el desarrollo del trabajo se consideraron cuatro factores principales: redundancia, capacidad de gestión, respuesta y robustez. Cada uno de ellos se analizó mediante sub-factores asociados con las condiciones físicas, funcionales, institucionales y sociales de la UPL. De esta manera, la evaluación no se centró únicamente en el posible daño de las edificaciones, sino también en otros elementos que pueden influir en la atención de la emergencia y en la recuperación del territorio.

La información recopilada fue clasificada y valorada mediante rangos, de acuerdo con las características de cada indicador. Posteriormente, estos valores se integraron en un sistema de lógica difusa, herramienta que permitió trabajar con variables que no tienen límites completamente exactos y representar la resiliencia como una condición gradual.

En este sentido, la metodología propuesta tuvo un alcance diagnóstico. Su finalidad no fue predecir con exactitud los daños o tiempos de recuperación ante un sismo, sino establecer una forma ordenada de valorar las condiciones que pueden favorecer o limitar la resiliencia ante eventos sísmicos de la UPL Tunjuelito, con ello, se buscó generar un insumo útil para la planeación territorial y la gestión del riesgo.

5.2 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA URBANA ANTE EVENTOS SÍSMICOS

Corresponde a la evaluación y análisis de componentes que permiten analizar el sistema territorial desde diferentes dimensiones, teniendo en cuenta no solo las condiciones físicas de las edificaciones y la infraestructura, sino también la existencia de elementos de respaldo, la capacidad institucional y la posibilidad de actuar oportunamente ante un evento sísmico.

Cada componente se evaluó a partir de variables previamente seleccionadas, las cuales fueron definidas de acuerdo con las características del territorio, la información disponible, la revisión bibliográfica previa y su relación con el comportamiento esperado del sistema ante un sismo. Para facilitar la interpretación de los resultados, cada variable fue calificada en una escala entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 representan condiciones más favorables para la resiliencia ante eventos sísmicos y los valores cercanos a 0 representan condiciones de menor favorabilidad.

5.2.1 Redundancia

La redundancia corresponde a la capacidad que tiene un sistema de seguir funcionando aun cuando uno o varios de sus componentes se vean afectados. En otras palabras, este criterio permite evaluar si dentro del territorio existen elementos de respaldo, sustitución o soporte que permitan mantener la funcionalidad general del sistema frente a la afectación de alguno de sus componentes. En ese sentido, la redundancia reduce las consecuencias de la falla, en la medida en que la pérdida o deterioro de un elemento no afecta de manera importante el sistema.

En el caso de la UPL, la redundancia no se limita a la presencia de estructuras repetidas, sino que se entiende como la posibilidad de sustitución funcional. Esto significa que el sistema será más redundante si cuenta con redes más densamente conectadas que puedan suplir más de un camino para conectar dos elementos en casi de que el camino “normal” de conexión se vea afectado por el evento disruptivo.

La redundancia de la UPL se determinó con base en la apropiación de la metodología de niveles de resiliencia presentados por (Zhang, Miller-Hooks, & Denny, 2015). Allí se investigó el papel de la topología de una red en la resiliencia del sistema que representa, medida desde variables de rendimiento, conectividad y compacidad. (Reggiani, Bucci, & Russo, 2010) propuso la utilización de las variables de conectividad (grado promedio y ciclicidad) como un marco que unifica la consideración de la resiliencia y la vulnerabilidad de las redes allí estudiadas (17 topologías emanadas del análisis de sistemas de transporte, comunicaciones, internet, teoría general de grafos, sistemas biológicos, entre otros)

En la investigación de (Zhang, Miller-Hooks, & Denny, 2015) se desarrolla la caracterización de las redes en términos de sus variables de conectividad y accesibilidad (grado promedio, ciclicidad y diámetro) para evaluar redundancias dentro de 4 escenarios relacionados con el evento disruptivo

- Capacidad inicial
- Capacidad si se realizan acciones de preparación para el evento disruptivo
- Capacidad di de realizan acciones de reparación en los nodos críticos de la red
- Capacidad si se realizan acciones de preparación y reparación

Los valores de comparación están dictados por los resultados obtenidos para una red lineal en donde la ruptura de un enlace convierte a la ruta entre un nodo A y un nodo B en la más largo posible para esa ruta (red de anillo) y una red idealizada donde el grado de conexión de los nodos varía entre 3 y 8 enlaces por nodo (red de cuadrícula completa). Estas redes se presentan en la Ilustración 3 y corresponden a la red tipo 4 y tipo 7 respectivamente, para ellas se presentan valores de resiliencia de 53.8 y 100 en ese orden.

Por último, se presenta la ecuación estimada de regresión con base en los datos presentados en el estudio. Para el escenario de capacidad inicial que considera las variables de conectividad y accesibilidad, el valor de R^2 de la ecuación es de 0.63 y es la siguiente:

$$R^{OD}(CC) = 69.04 - 0.6 * d + 0.02 * D + 0.65 * C$$

Ecuación 1. Redundancia en una red, estado inicial
Fuente: (Zhang, Miller-Hooks, & Denny, 2015)

Con estos valores definidos, la sensibilidad del sistema está dada por el diámetro de la red, alcanzando los niveles más altos para grandes redes con longitudes de 1750 arcos. Si se mantiene una proporcionalidad entre el número de arcos y el diámetro de la red, se alcanzarían los niveles máximos de resiliencia para redes de más de 62000 arcos.

Para adaptar la metodología y aplicar la ecuación, se trabajó en las redes que tienen la configuración nodo + enlace (malla vial, acueducto, alcantarillado sanitario, alcantarillado pluvial) aplicando el siguiente procedimiento en un software para la gestión de SIG (sistemas de información geográfica)

1. Depuración de geometría: Debido a la interacción entre las capas geométricas dentro del proceso de gestión de los sistemas de información geográfica generó recortes de geometría que crea enlaces huérfanos. Si bien estos pertenecen al territorio estudiado, la delimitación de la UPL generó estos recortes que deben ser o purgados si no están asociadas a un nodo cercano y no conforman un grupo de enlaces que pueda configurar un ciclo o conectados a la red existente mediante la modificación de la capa para llevar los nodos existentes a sus vecinos más próximos. La Ilustración 14 presenta el proceso descrito: a la izquierda la capa original (amarillo) y la delimitación sobre la que se hará el recorte (rojo), en el centro la capa original recortada (azul) y la capa de delimitación (rojo) y a la izquierda el par de enlaces huérfanos que serán eliminados de la capa

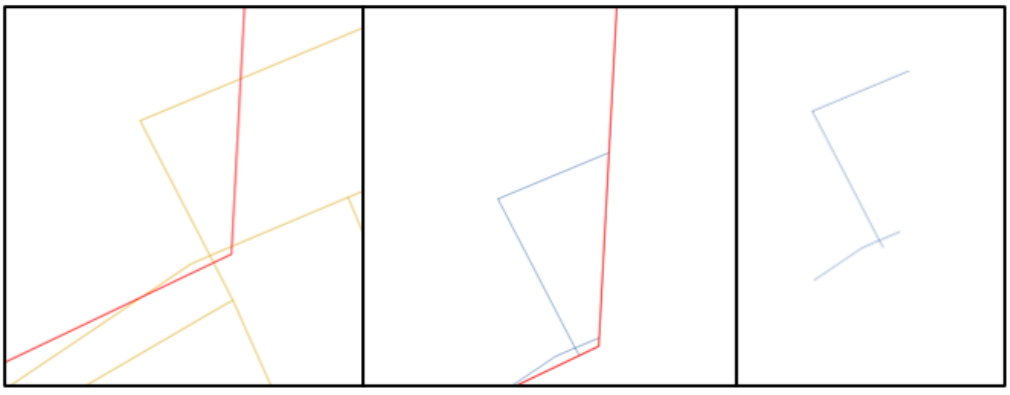


Ilustración 14 depuración de enlaces huérfanos
Fuente: Información procesada por autores

Si el enlace o grupo de enlaces huérfanos conforman por lo menos un ciclo o contienen más de un nodo de intersección de enlaces, se modifica la red para que se conecten los enlaces que no hacen parte del ciclo a la red general. La Ilustración 15 presenta el proceso de la misma manera en que la ilustración anterior: arriba la capa original (azul) junto a la capa de delimitación (rojo), en el centro la capa recortada y la capa delimitadora de recorte y abajo la capa recortada ajustada para conectar el ciclo huérfano y la purga de los enlaces huérfanos conforme al proceso anterior.

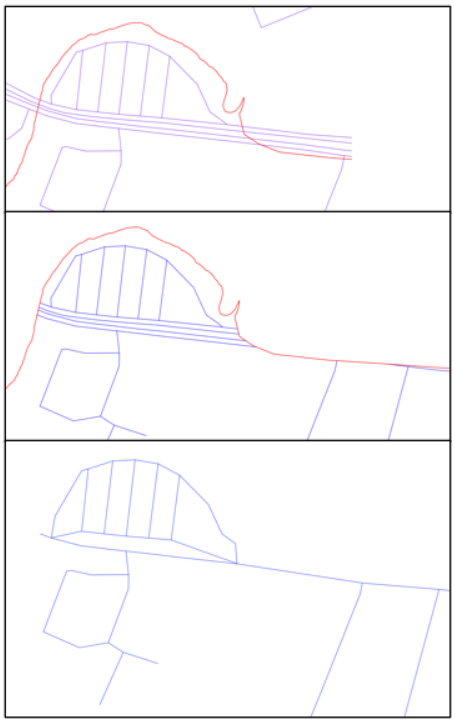


Ilustración 15 anexión de ciclos huérfanos
Fuente: Información procesada por autores

Una vez se tiene la geometría se procede al paso 2:

2. Ajuste de la geometría: El análisis de redes necesita nodos bien definidos donde haya convergencia de los enlaces a un mismo punto infinitesimal, y debido a la

naturaleza de la recolección y modelado de las redes, hay muchos lugares en donde esto no sucede por diferencias en elevación, conexiones erradas y la más recurrente: la naturaleza misma de las redes. La Ilustración 16 muestra un ejemplo de este ajuste: las esquinas de manzana en la red de acueducto tienen convergencias separadas una longitud de 60 cm en promedio, arriba, se muestra la red sin el ajuste de convergencia y abajo se muestra la misma red con el ajuste realizado. De esta manera se puede construir la retícula de análisis sin nodos intermedios innecesarios que aumenten la densidad de la red en una manera no representativa

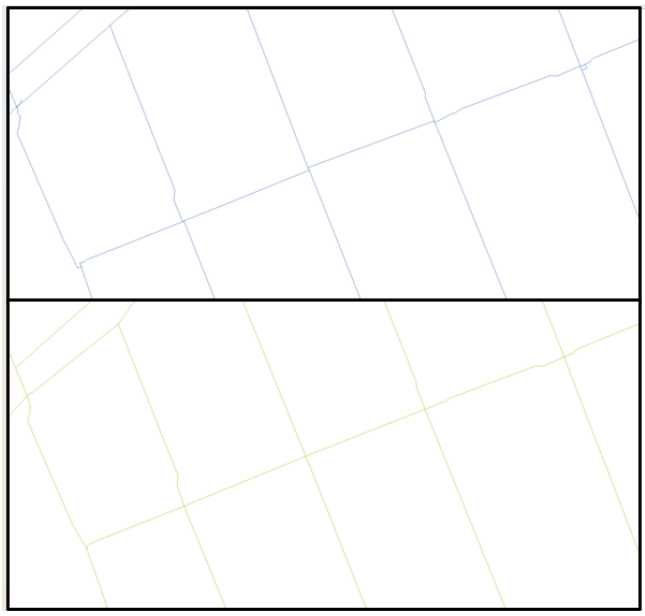


Ilustración 16 Ajuste de nodos
Fuente: Información procesada por autores

3. Ejecutar un script que analice la red y extraiga las variables descriptivas y las representativas para calcular la resiliencia según la ecuación mostrada. El script ejecutado en la consola de Python dentro del software GIS fue el siguiente:

```
import networkx as nx

def ejecutar_analisis_grafos():
    layer = iface.activeLayer()
    if not layer or layer.geometryType() != 1:
        print("Error: Selecciona una capa vectorial de líneas
válida.")
        return

    # 1. Construcción del grafo
    G = nx.Graph()
    for f in layer.getFeatures():
        geom = f.geometry()
        if geom and not geom.isEmpty():
            nodes = geom.asPolyline() if not geom.isMultipart()
else geom.asMultiPolyline()[0]
            # Redondeo de coordenadas para tolerancia topológica
            p1 = (round(nodes[0].x(), 6), round(nodes[0].y(), 6))
            p2 = (round(nodes[-1].x(), 6), round(nodes[-1].y(), 6))
            G.add_edge(p1, p2, fid=f.id())

    # 2. Cálculo de variables principales
    v = G.number_of_nodes()       # Nodos
    e = G.number_of_edges()       # Arcos

    subgrafos_en_el_grafo = len(list(nx.connected_components(G)))
# Componentes conexas (p)
    mu = e - v + subgrafos_en_el_grafo
# Número Ciclomático

    # Diámetro
    if subgrafos_en_el_grafo == 1:
        diameter = nx.diameter(G)
    else:
        components = list(nx.connected_components(G))
        largest_cc = max(components, key=len)
        G_sub = G.subgraph(largest_cc)
        diameter = nx.diameter(G_sub)

    d = (2 * e) / v if v > 0 else 0   # Grado promedio
    cyclicity_per_node = mu / v if v > 0 else 0

    # Índices topológicos
    alpha_no_p = (mu / (2 * v - 5)) * 100 if (2 * v - 5) != 0 else
0
    alpha_with_p = (mu / (2 * v - 5 * subgrafos_en_el_grafo)) * 100
if (2 * v - 5 * subgrafos_en_el_grafo) != 0 else 0
    beta = e / v if v > 0 else 0
    gamma = (e / (3 * (v - 2))) * 100 if (v - 2) > 0 else 0

    # 3. Impresión de resultados en consola
    print("\n" + "=" * 55)
    print("      RESUMEN DE MÉTRICAS TOPOLÓGICAS DE LA RED")
```

```
    print("=" * 55)
    print(f" Nodos (v)                    : {v}")
    print(f" Arcos (e)                    : {e}")
    print(f" Subgrafos en el grafo        :
{subgrafos_en_el_grafo}")
    print(f" Número Ciclomático (μ)       : {mu}")
    print(f" Diámetro (D) [en arcos]      : {diameter}")
    print("-" * 55)
    print(f" Grado Promedio (d)           : {d:.4f}")
    print(f" Ciclicidad (ciclos/nodo)     :
{cyclicity_per_node:.4f}")
    print(f" Índice Alfa sin p (α)        : {alpha_no_p:.2f}%")
    print(f" Índice Alfa con p (α)        : {alpha_with_p:.2f}%")
    print(f" Índice Beta (β)              : {beta:.4f}")
    print(f" Índice Gamma (γ)             : {gamma:.2f}%")
    print("=" * 55 + "\n")

# Ejecutar script
ejecutar_analisis_grafos()
```

5.2.2 Capacidad de gestión

La capacidad de gestión se refiere a las condiciones que tiene la UPL para prepararse, organizarse y tomar decisiones frente a un evento sísmico. En el trabajo de (DELGADO, 2023), este parámetro se relaciona con la preparación, el manejo de la emergencia y la respuesta del sistema para afrontar un evento que afecta su funcionamiento.

En este trabajo, la capacidad de gestión se entiende como una forma de adaptar el concepto de *resourcefulness* usado en los estudios de resiliencia, el cual se relaciona con la manera en que un territorio puede organizarse y usar los recursos que tiene disponibles antes, durante y después de un evento sísmico. Para el caso de una UPL, no solo se revisa si existen recursos físicos o entidades de atención, sino también si hay instrumentos de gestión del riesgo, coordinación entre instituciones y condiciones sociales que puedan facilitar o limitar la respuesta y la recuperación; por esta razón, la capacidad de gestión permite valorar qué tan preparado está el territorio, desde el punto de vista institucional y organizativo, para enfrentar una emergencia sísmica.

Esta forma de entender la gestión coincide con la definición de *resourcefulness* de Cimellaro, Reinhorn y Bruneau (2010), quienes la describen como la capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos materiales y humanos cuando algún elemento del sistema está en riesgo de interrumpirse. Estos autores señalan

que, incluso en una sociedad con recursos, el tiempo de recuperación puede alargarse por una planeación deficiente, por fallas organizacionales o por políticas poco efectivas, y que donde los recursos son escasos ese tiempo tiende a crecer. De ahí salen los tres sub-factores usados en este trabajo: los instrumentos de gestión del riesgo representan la planeación, la presencia y articulación de las entidades representa la parte organizacional, y la estratificación socioeconómica se usa como una aproximación a los recursos propios con los que cuenta la población.

Los mismos autores advierten que esta propiedad, al igual que la redundancia, depende de factores humanos y de los recursos disponibles, por lo que no cuenta con una función analítica para calcularla de forma directa. Por esa razón, en este trabajo se valora con variables lingüísticas y se integra mediante lógica difusa, que permite trabajar con condiciones intermedias entre una gestión suficiente y una inexistente.

Para este caso, la capacidad de gestión se calculó a partir de los siguientes sub-factores: existencia de instrumentos de gestión del riesgo, presencia de entidades u organismos de atención, articulación entre instituciones y estratificación socioeconómica, cuyo detalle de valoración se presenta en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente.

Para la variable de instrumentos de gestión de riesgos se estableció un valor de cuantificación de la unidad con tres conjuntos de términos, estos están establecidos teniendo en cuenta la cantidad de instrumentos de gestión de riesgos existente en la UPL y si los mismo se aplican conforme lo planeado en su contenido, teniendo una cuantificación que dependerá de la relación entre la cantidad de instrumentos de gestión de riesgo que cumplen con lo planeado en la UPL y la cantidad de instrumentos de gestión de riesgo en la UPL. Para verificar esa relación se revisan cuatro condiciones que pueden comprobarse en documentos oficiales: la existencia de un plan distrital de gestión del riesgo vigente, la adopción de un plan local, la realización periódica de ejercicios de preparación como los simulacros y la existencia de un instrumento formulado o actualizado a la escala de la UPL. El valor de cuantificación es la fracción de condiciones que se cumplen, de modo que puede tomar valores intermedios entre los tres conjuntos de la tabla. Estas condiciones parten de lo dispuesto por el Congreso de la República de Colombia (2012) en la Ley 1523 de 2012,

que exige planes de gestión del riesgo y estrategias de respuesta en los distintos niveles territoriales.

Tabla 4 Relación capacidad de gestión e instrumentos de gestión de riesgos
Fuente: Información procesada por autores

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Optimo	1	Existen instrumentos de gestión de riesgo y se aplican conforme lo planeado en ellos
Regular	0.5	Existen instrumentos de gestión de riesgo, pero no se aplican conforme lo planeado en ellos
No posee	0	No existen instrumentos de gestión del riesgo

La valoración de la capacidad de gestión se definió tomando como referencia metodológica el trabajo de (Pedreros & Roncancio, 2022), en el cual este criterio se relacionó con la posibilidad de prepararse, responder y manejar un evento irregular de manera rápida y eficiente. En ese estudio, la capacidad de gestión fue evaluada a partir de la existencia de políticas de riesgo, la condición del entorno construido y la velocidad de respuesta de las entidades competentes. Por esta razón, dicho antecedente resulta pertinente para el presente trabajo, ya que permite trasladar el concepto de gestión desde una escala puntual, asociada a una excavación, hacia una escala territorial, asociada a una UPL.

Para la presencia de entidades u organismos de atención articuladas se estableció un valor de cuantificación de la unidad con tres conjuntos de términos, estos están establecidos teniendo en cuenta la cantidad de entidades u organismos de atención existentes en la UPL y si los mismo se articulan entre ellos, teniendo una cuantificación que dependerá de la relación entre la cantidad de entidades u organismo de atención que se articulan entre ellos en la UPL y la cantidad de entidades u organismos de atención en la UPL. En la aplicación se verifican cuatro condiciones: la presencia de instituciones de salud dentro de la UPL, la presencia de al menos un organismo de socorro, la vinculación de estas entidades a un marco de coordinación distrital para la respuesta a emergencias y la existencia de una instancia de coordinación propia de la UPL. El valor de cuantificación es la fracción de condiciones verificadas.

Tabla 5 Relación capacidad de gestión y presencia de entidades u organismos de atención articuladas
Fuente: Información procesada por autores

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Suficiente	1	Existen entidades u organismo de atención dentro de la UPL y están articulados entre ellos
Regular	0.5	Existen entidades u organismos de atención dentro de la UPL, pero no están articulados entre ellos
Deficiente	0	No existen entidades u organismos de atención dentro de la UPL

La estratificación socioeconómica no depende del ingreso bruto de la población sino de las características físicas externas de la vivienda, su entorno inmediato y su contexto urbanístico (BOGOTÁ A. , 2018), por tanto, puede definir la capacidad de la población de una UPL para gestionar un evento disruptivo como un sismo. La escala de seis estratos se divide en tres intervalos de igual amplitud, que dan lugar a los tres conjuntos de términos de la variable: estratos 1 y 2, estratos 3 y 4, y estratos 5 y 6.

Tabla 6 Relación capacidad de gestión y estratificación socioeconómica
Fuente: Información procesada por autores

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Alta	1	La mayoría de la población está entre los estratos 5 y 6
Media	0.5	La mayoría de la población está entre los estratos 3 y 4
Baja	0	La mayoría de la población está entre los estratos 1 y 2

De acuerdo con ello se define el sistema difuso de entrada, como se evidencia en la Tabla 7, asimismo el respectivo sistema difuso de salida es el correspondiente a la Tabla 8.

Tabla 7 Sistema difuso de entrada de capacidad de gestión
Fuente: Información procesada por autores

ENTRADA

Variable lingüística	Conjunto términos	Universo de discurso	Función de membresía
Instrumentos de gestión del riesgo	Optimo	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Regular		Trimf [0,0.5,1]
	No posee		Trimf [-0.5,0,0.5]
Presencia de entidades u organismos articuladas	Suficiente	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Regular		Trimf [0,0.5,1]
	Deficiente		Trimf [-0.5,0,0.5]
Estratificación socioeconómica	Alta	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Media		Trimf [0,0.5,1]
	Baja		Trimf [-0.5,0,0.5]

Tabla 8 Sistema difuso de salida de capacidad de gestión
Fuente: Información procesada por autores

ENTRADA			
Variable lingüística	Conjunto términos	Universo de discurso	Función de membresía
Capacidad de gestión	Capacidad de gestión	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Regular capacidad de gestión		Trimf [0,0.5,1]
	No tiene Capacidad de gestión		Trimf [-0.5,0,0.5]

Después de definir las variables de entrada y salida, se plantearon las reglas de inferencia que se muestran en la Tabla 9, donde se interrelacionan las condiciones evaluadas (instrumentos de gestión del riesgo, presencia de entidades u organismos articulados y estratificación socioeconómica), esta última entendida como un indicador aproximado y no a una medición completa de la capacidad de resiliencia ante eventos sísmicos medida desde la capacidad de gestión.

Tabla 9 Reglas de inferencia de capacidad de gestión
Fuente: Información procesada por autores

Variables de entrada			Variable de salida
Instrumentos de gestión del riesgo	Presencia de entidades u organismos articulados	Estratificación socioeconómica	Capacidad de gestión
Optimo	Suficiente	Alta	Capacidad de gestión
		Media	Capacidad de gestión
		Baja	Regular capacidad de gestión
	Regular	Alta	Capacidad de gestión
		Media	Regular capacidad de gestión
		Baja	Regular capacidad de gestión
	Deficiente	Alta	Capacidad de gestión
		Media	Regular capacidad de gestión
		Baja	No tiene capacidad de gestión
Regular	Suficiente	Alta	Capacidad de gestión
		Media	Regular capacidad de gestión
		Baja	No tiene capacidad de gestión
	Regular	Alta	Regular capacidad de gestión
		Media	Regular capacidad de gestión
		Baja	No tiene capacidad de gestión
	Deficiente	Alta	Regular capacidad de gestión
		Media	No tiene capacidad de gestión
		Baja	No tiene capacidad de gestión
No posee	Suficiente	Alta	Capacidad de gestión
		Media	Regular capacidad de gestión
		Baja	No tiene capacidad de gestión
	Regular	Alta	Regular capacidad de gestión
		Media	No tiene capacidad de gestión
		Baja	No tiene capacidad de gestión
	Deficiente	Alta	No tiene capacidad de gestión
		Media	No tiene capacidad de gestión
		Baja	No tiene capacidad de gestión

La estructura del sistema difuso utilizado para la evaluación de la 0,5 se presenta en lallustración 17, donde se muestran las tres variables de entrada y la variable de salida definida para el análisis.

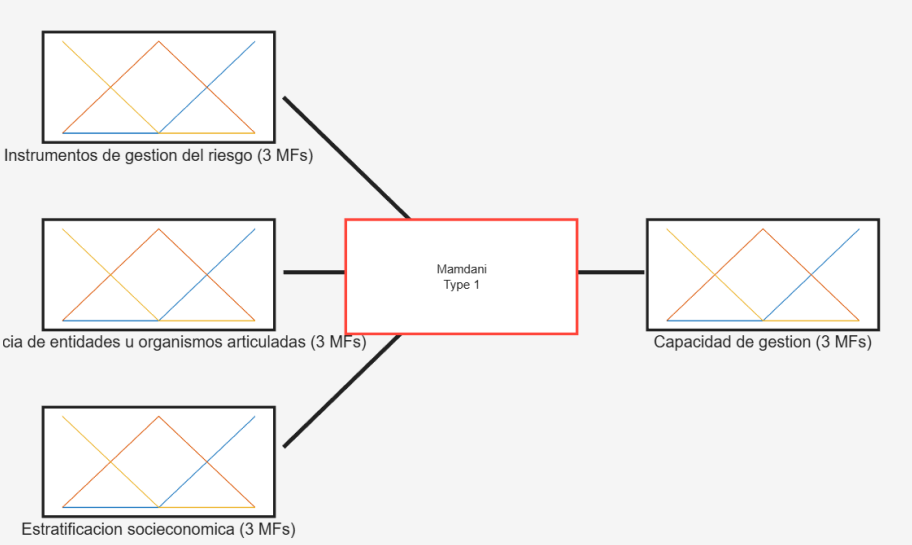


Ilustración 17 Lógica difusa de capacidad de gestión
Fuente: Información procesada por autores

Ahora bien, en la Ilustración 18 se presentan las superficies de control obtenidas para el análisis de la capacidad de gestión, las cuales permiten observar cómo cambia la salida del sistema cuando se combinan las diferentes condiciones de las variables de entrada.

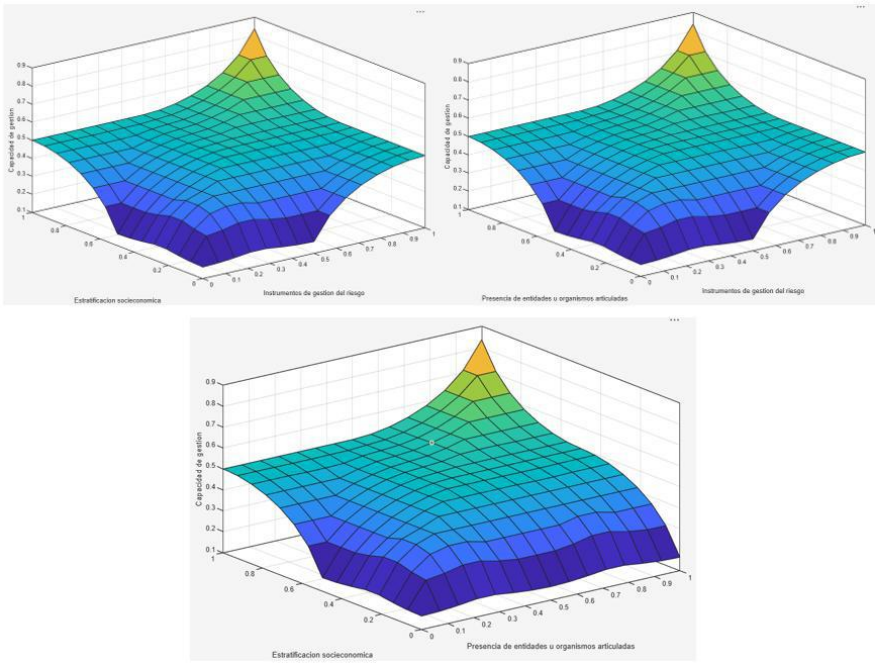


Ilustración 18 Superficie de control de capacidad de gestión
Fuente: Información procesada por autores

5.2.3 Capacidad de Respuesta

En este trabajo, la respuesta se refiere a la capacidad que tiene la UPL para atender los efectos inmediatos de un sismo; este criterio se diferencia de la capacidad de gestión, porque no se centra en la planeación previa, sino en los elementos que podrían activarse o utilizarse una vez ocurre la emergencia.

Dentro de las 4R de la resiliencia, este criterio se relaciona con la rapidez en la recuperación, lo que en el presente trabajo se define como respuesta. Esta condición hace referencia al tiempo que tarda un sistema en reaccionar y empezar a recuperar parte de su funcionamiento después de un evento disruptivo (Bruneau & Chang, 2003), (LU & LIAO, 2020). En ese sentido, una respuesta más favorable no significa que el territorio no vaya a sufrir daños, sino que cuenta con mejores condiciones para atenderlos en menor tiempo.

Cimellaro, Reinhorn y Bruneau (2010) definen la rapidez como la capacidad de cumplir prioridades y alcanzar objetivos a tiempo para contener pérdidas, recuperar la funcionalidad y evitar nuevas interrupciones. En términos matemáticos corresponde a la pendiente de la curva de funcionalidad durante la recuperación, y su valor promedio puede expresarse como la pérdida de funcionalidad dividida entre el tiempo de recuperación. Como para una UPL no se dispone de curvas de recuperación medidas, en este trabajo la respuesta se evalúa a partir de los recursos que determinan la forma de esa curva.

Los mismos autores describen tres formas de recuperación según la preparación de la comunidad: una recuperación lineal, que se usa cuando no hay información sobre la preparación y los recursos; una exponencial, cuando la respuesta se apoya en un flujo inicial de recursos disponibles; y una trigonométrica, lenta al comienzo, cuando la organización o los recursos son limitados. Los tres conjuntos de términos de los sub-factores de respuesta siguen esa lógica. El nivel alto corresponde a un territorio que tiene disponibles desde el inicio los espacios, las vías y los servicios necesarios para atender la emergencia; el nivel medio, a una disponibilidad parcial; y el nivel bajo, a un territorio que depende de recursos externos para empezar a responder.

Para la UPL se revisaron los elementos físicos y funcionales que pueden apoyar la atención inicial de la población.

Entre estos se incluyeron las variables lingüísticas de espacios de apoyo comunitario, vías de acceso y cobertura de servicios esenciales, que permitirán identificar qué tan fácil o difícil sería atender una emergencia en el territorio, más allá de que existan documentos o planes institucionales. El conjunto de términos definidos para cada una de estas variables es de tres y su universo de discurso en la unidad, el valor de la cuantificación para estos es de forma empírica y depende del desperdicio del evaluador en base a la información veraz disponible, pero tomando como valor de cuantificación de cero en el caso de que la UPL no cuente con espacios comunitarios de apoyo o cobertura de servicios esenciales.

En la Tabla 10 se presenta el sistema difuso de entrada definido para la respuesta.

Tabla 10 Sistema difuso de entrada de respuesta
Fuente: Información procesada por autores

ENTRADA			
Variable lingüística	Conjunto términos	Universo de discurso	Función de membresía
Espacios de apoyo comunitario	Suficiente	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Regular		Trimf [0,0.5,1]
	No posee		Trimf [-0.5,0,0.5]
Vías de acceso	Suficiente	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Regular		Trimf [0,0.5,1]
	Deficiente		Trimf [-0.5,0,0.5]
Cobertura de servicios esenciales	Suficiente	0-11	Trimf [0.5,1,1.5]
	Regular		Trimf [0,0.5,1]
	No posee		Trimf [-0.5,0,0.5]

La salida del sistema corresponde al nivel de respuesta de la UPL. Esta variable se valoró en un rango de 0 a 1 y se clasificó en tres grupos: con respuesta, respuesta regular y no tiene respuesta, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Sistema difuso de salida de respuesta
Fuente: Información procesada por autores

ENTRADA			
Variable lingüística	Conjunto términos	Universo de discurso	Función de membresía
Respuesta	Con Respuesta	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Respuesta regular		Trimf [0,0.5,1]
	No tiene respuesta		Trimf [-0.5,0,0.5]

Después de definir las variables, se plantearon las reglas de inferencia que se presentan en la Tabla 12, donde se combina la disponibilidad de espacios de apoyo comunitario, vías de acceso y servicios esenciales.

Tabla 12 Reglas de inferencia de respuesta
Fuente: Información procesada por autores

Variables de entrada			Variable de salida
Espacios de apoyo comunitario	Vías de acceso	Cobertura de servicios esenciales	Respuesta
Suficiente	Suficiente	Suficiente	Con respuesta
		Regular	Con respuesta
		No posee	Respuesta regular
	Regular	Suficiente	Con respuesta
		Regular	Respuesta regular
		No posee	Respuesta regular
	Deficiente	Suficiente	Con respuesta
		Regular	Respuesta regular
		No posee	No tiene respuesta
Regular	Suficiente	Suficiente	Con respuesta
		Regular	Respuesta regular
		No posee	No tiene respuesta
	Regular	Suficiente	Respuesta regular
		Regular	Respuesta regular
		No posee	No tiene respuesta
	Deficiente	Suficiente	Respuesta regular
		Regular	No tiene respuesta
		No posee	No tiene respuesta
No posee	Suficiente	Suficiente	Con respuesta
		Regular	Respuesta regular
		No posee	No tiene respuesta
	Regular	Suficiente	Respuesta regular
		Regular	No tiene respuesta
		No posee	No tiene respuesta
	Deficiente	Suficiente	No tiene respuesta
		Regular	No tiene respuesta
		No posee	No tiene respuesta

La Ilustración 19 muestra la estructura del sistema difuso usado para este parámetro, con sus tres variables de entrada y la variable de salida.

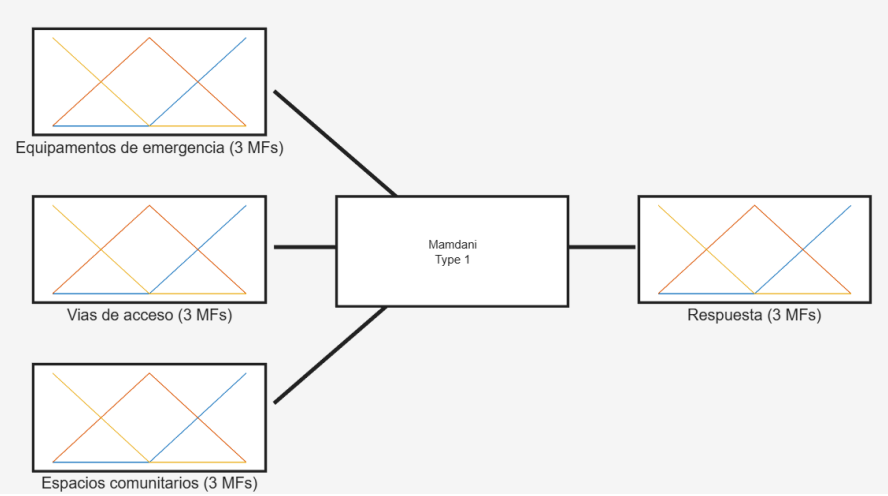


Ilustración 19 Lógica difusa de Respuesta
Fuente: Información procesada por autores

Por último, en la Ilustración 20 se presentan las superficies de control de respuesta. Estas permiten ver cómo cambia el resultado final según la combinación de las variables analizadas.

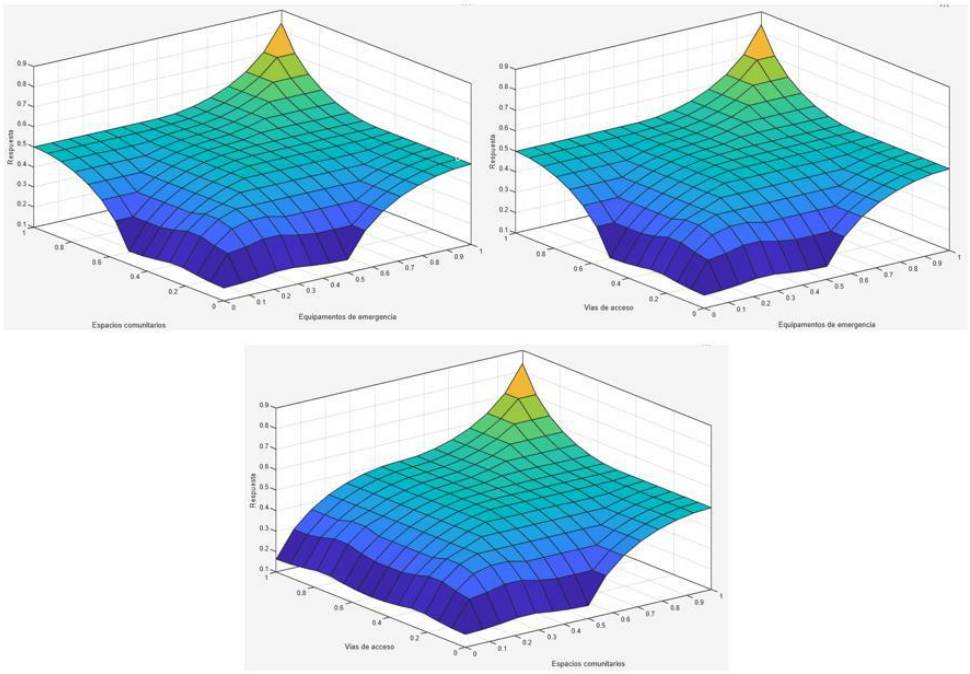


Ilustración 20 Superficie de control de respuesta
Fuente: Información procesada por autores

5.2.4 Robustez

La robustez, se define como la fuerza o capacidad de los elementos, sistemas y otras unidades de análisis para soportar un determinado nivel de estrés o demanda sin sufrir degradación o pérdida de función (Bruneau & Chang, 2003). Los elementos que conforman el área de estudio y sobre los que pueden observar características que aporten a la robustez son los elementos físicos de la infraestructura (edificaciones, vías, redes vitales) porque están conformadas por elementos que históricamente han tenido estudios de ingeniería de materiales y de redes bajo escenarios de exigencia que simulan niveles de desempeño cercanos a la falla misma de los materiales.

Hablar de la resiliencia ante eventos sísmicos desde las medidas complementarias implica las consecuencias reducidas de las fallas, buscando mitigar las afectaciones que pueden generarse sobre la población. Y el componente con mayor índice de uso en términos de seguridad de la vida es el de edificaciones por concentrar la mayor cantidad de personas en la mayoría de los momentos del día. Entonces aplicar el análisis de robustez sobre las edificaciones es considerar el elemento sensible de la red en cuanto a la seguridad territorial instantánea durante el sismo y en los instantes posteriores a él.

La Norma sismorresistente del 2010 (NSR-10) indica los grupos de importancia III y IV que hacen referencia a edificaciones como hospitales, aeropuertos, estaciones de bomberos, edificios de refugio para emergencias, para control de redes vitales, universidades, colegios, guarderías, entre otros. Y las cuales deben operar durante y después de un sismo o que son indispensables para atender emergencias, preservando la salud y vida de las personas. Y los grupos de importancia I y II, como vivienda, centros de reunión, edificios gubernamentales, entre otros y que no tienen la misma restricción de funcionamiento de los otros dos grupos, en donde durante el proceso de diseño, las fuerzas sísmicas se mayoran como factor de seguridad.

El índice de vulnerabilidad obtenido mediante la aplicación del capítulo A.10 es el requerido por normatividad nacional para cualquier estudio sobre vulnerabilidad en el país, sin embargo, pueden aplicarse métodos auxiliares que complementen o mejoren la interpretación de los resultados y del estado actual de estructuras en Colombia, por esto es importante conocer los alcances y limitaciones de estas metodologías. Su objetivo es

predecir el daño esperado en la estructura, un grupo de estructuras o toda una zona urbana, bajo los efectos de sismos de determinadas características (MOYA, BARBAT, & CANAS, 1996), establecida en la microzonificación sísmica de Bogotá.

Para definir la robustez del sistema analizado, en este caso la UPL, se busca hacerlo a partir de un análisis de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones existentes dentro de la zona estudiada. La primera aproximación al término se encuentra en el literal A.10 e la norma sismorresistente, donde se define la vulnerabilidad sísmica de una edificación como el inverso del índice de flexibilidad general, interpretado como una fracción de la rigidez que tendría una edificación nueva construida de acuerdo con los requisitos vigentes del reglamento. Sin embargo, el índice de flexibilidad es la relación entre los desplazamientos de cada estructura y los mayores permisibles por el reglamento, es decir, se requiere realizar el procesamiento matemático propio a la edificación para obtener resultados locales. Siendo este un análisis zonal se empleó un método auxiliar: el método de la HMC, Housing and municipal corporation de Queensland, Australia (1997) que fue desarrollada como una herramienta de clasificación rápida para la gestión del riesgo sísmico urbano, que hace un diagnóstico de vulnerabilidad que, si bien es individual, permite tener en cuenta cuatro (4) variables que se pueden medir mediante acceso remoto y basados en sistemas geoespaciales. De esta forma se puede aplicar la metodología a los sectores de la UPL que muestran las categorías presentadas en el capítulo de marco espacial. La metodología HMC si bien se desvía de las curvas de daño usadas típicamente para definir la vulnerabilidad sísmica de una edificación o de las consideraciones estructurales usadas en otros análisis de resiliencia, parte de que este es un análisis de un sistema compuesto por múltiples unidades que en sí mismas tienen la compleja interacción de elementos que se abordan en estos estudios de resiliencia o desempeño estructural. Ante este escenario se puede estimar una variación de los resultados que se obtendrían al hacer un análisis de vulnerabilidad típico de NSR-10 o de curvas de daño con el obtenido bajo la metodología HMC, pero es importante destacar que se pretende usar la metodología como un método diagnóstico inicial que si considera variables importantes y relacionadas a características definidas en los grupos de uso (tipo de edificación y ocupación de la misma), cruzándolas con variables que representan la amenaza (tipo de suelo y aceleración en superficie). Este cruce de variables si permite darle un nivel aceptable de confiabilidad al uso de la

metodología teniendo en cuenta que participa junto con otras 3 propiedades para definir la resiliencia ante eventos sísmicos del área de estudio. La elección de la metodología también se da en función de los datos disponibles en el capítulo de marco espacial, donde se presentan características del tipo de suelo, usos de la edificación, población relacionada y aceleración espectral en superficie. Desde el análisis de resiliencia y como se presentó más adelante, se hace un análisis global con base en el procesamiento de la información presentada. Pero la metodología HMC por sí misma sirvió como herramienta de análisis de robustez detallada al nivel de manzana catastral, según los datos presentados en el capítulo de marco espacial, porque usando las herramientas de procesamiento de datos geoespaciales se pueden incorporar mapas de calor que ayuden a determinar las zonas de menor robustez dentro de la UPL o el área estudiada.

Método HMC (1997)

La clasificación por nivel de vulnerabilidad potencial se presentó por primera vez en las “Directrices de mitigación del daño sísmico en Queensland, Australia” por el HMC, en 1997.

El método toma como base de análisis que la vulnerabilidad no es una función puramente estructural, sino que depende de factores externos como el entorno físico y el impacto que puede generar una falla, presentando entonces un análisis de riesgo sísmico que toma en cuenta variables de vulnerabilidad, pero también de amenaza sísmica. Dicho riesgo de falla para una edificación se basa en las condiciones potencialmente dañinas que causan:

- El incremento en las solicitaciones de diseño debidas al evento sísmico (incremento de cargas por aceleración)
- El nivel de funcionalidad esperado en un escenario Post-sismo
- El número de ocupantes del edificio

El nivel de vulnerabilidad potencial se puede determinar mediante el uso de cuatro (4) factores de riesgo asociados a las causas mencionadas anteriormente, que, si bien son autónomos en su definición como reglamento internacional, consideran algunos criterios que son trazables dentro de la normativa nacional, como sigue:

- Factor por el perfil de suelo: que se relación con los perfiles de suelos de la microzonificación sísmica de Bogotá D.C. correspondientes a Piedemonte C y Aluvial 50, 100, y 200, el número refiere la altura de la capa.
- Factor por grupo de uso: llamado factor de riesgo de la función post desastre en la metodología HMC, relaciona las edificaciones con los 4 grupos de uso definidos en el literal A.2.5.1. NSR-10
- Factor por aceleración pico efectiva: llamado riesgo de localidad en la metodología HMC, hace referencia a los valores de la aceleración pico efectiva, misma que está definida en el literal A.2.2.1 de la NSR-10 y cuyos valores para Bogotá se definen en el estudio de microzonificación sísmica (decreto 523 de 2010)
- Factor debido al número de habitantes que utilizan el edificio, llamado factor de riesgo de edificio en la metodología HMC.
- Factor debido al número de habitantes que utilizan el edificio, llamado factor de riesgo de edificio en la metodología HMC.

Los factores pueden tener valores que fluctúan entre 1 y 5, exceptuando el relacionado con el grupo de uso que varía entre 1 y 4. El método define un valor al sumar los cuatro factores obteniendo un rango entre 4 para una edificación con baja vulnerabilidad y 19 para una edificación con alta vulnerabilidad. El método de lógica difusa nos permite simplificar la cuantificación de la vulnerabilidad al establecer un valor de salida del universo de discurso de la unidad, siendo 0 una edificación con baja vulnerabilidad y 1 una edificación con alta vulnerabilidad.

Para la variable lingüística de riesgo de perfil de suelo, se determinan los perfiles de suelo existentes en la UPL mediante la microzonificación sísmica de Bogotá, que para la UPL de estudio son Piedemonte C, Aluvial 50, Aluvial 100 y Aluvial 200. Conforme se observa en Ilustración 12 en comportamiento de perfil de suelos es más deficiente el Piedemonte C por lo que se da el valor máximo del método que es 4 y el más eficiente Aluvial 200 por lo que se da el menor valor del método que es 1, los demás perfiles de suelo estarían entre estos factores.

Tabla 13 Relación robustez y riesgo de perfil de suelo
Fuente: (Mena Hernandez, 2002)

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Piedemonte C	4	El suelo en la subzona de análisis corresponde a Piedemonte C
Aluvial 50	3	El suelo en la subzona de análisis corresponde a Aluvial 200
Aluvial 100	2	El suelo en la subzona de análisis corresponde a Aluvial 100
Aluvial 200	1	El suelo en la subzona de análisis corresponde a Aluvial 50

La variable lingüística de riesgo de localidad depende de la aceleración pico efectiva conforme el método HMC, la lógica difusa nos permite simplificar el universo de discurso al ingresar directamente la aceleración pico efectiva establecida para la UPL teniendo en cuenta que los perfiles de suelo de esta el valor de aceleración varía entre 0.3 y 0.6 conforme la Ilustración 12

Para el riesgo del edificio, el método HMC establece una relación de vulnerabilidad que depende de la cantidad de ocupantes del edificio, siendo altamente vulnerable si lo ocupan 50 o más personas y con baja vulnerabilidad si lo hacen 5 o menos personas, se establece tres conjuntos de términos y el valor de cuantificación depende de la relación de la población total de la UPL entre la cantidad de edificaciones registradas en la misma.

Por último, la variable lingüística de función post desastre del método HMC depende del nivel de funcionalidad del uso de las edificaciones, estableciendo una calificación de 4 si son residenciales, 3 si no son necesarias, 2 si son necesarias y de 1 si son esenciales, para esto se analizan los diferentes tipos de edificaciones en la UPL y se establece el de mayor relevación conforme su porcentaje de presencia en la misma.:

Tabla 14 Relación robustez y función post desastre
Fuente: (Mena Hernandez, 2002)

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Residencial	4	La subzona corresponde a edificación tipo residencial
No necesario	3	La subzona corresponde a edificación tipo no necesario
Necesario	2	La subzona corresponde a edificación tipo necesario
Esencial	1	La subzona corresponde a edificación tipo esencial

Una vez obtenidas las relaciones de la subzona, se ingresaron estos datos en el sistema difuso de robustez conforme la siguiente tabla:

Tabla 15 Sistema difuso de entrada de robustez
Fuente: Información procesada por autores

ENTRADA			
Variable analizada	Variables Lingüísticas	Universo de discurso	Función de membresía
Riesgo de perfil de suelo	Piedemonte C	1-4	Trimf [3,4,5]
	Aluvial 50		Trimf [2,3,4]
	Aluvial 100		Trimf [1,2,3]
	Aluvial 200		Timf [-2,1,2]
Riesgo de localidad	Alto	0.3-0.6	Trimf [0.45,0.6,0.7]
	Medio		Trimf [0.3,0.45,0.6]
	Bajo		Trimf [-0.6,0.3,0.45]
Riesgo de edificio	Alto	5-50	Trimf [25,50,60]
	Medio		Trimf [5,25,50]
	Bajo		Trimf [-25,5,25]
Función post desastre	Residencial	1-4	Trimf [3,4,5]
	No necesario		Trimf [2,3,4]
	Necesario		Trimf [1,2,3]
	Esencial		Timf [-2,1,2]

Tabla 16 Sistema difuso de salida de robustez
Fuente: Información procesada por autores

ENTRADA			
Variable lingüística	Conjunto términos	Universo de discurso	Función de membresía
Vulnerable	Alto	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Medio		Trimf [0,0.5,1]
	bajo		Trimf [-0.5,0,0.5]

Debido a que el método HMC establece un nivel de vulnerabilidad, pero no define la robustez, esta se determina como el opuesto, por ende, los valores bajos que muestran menor vulnerabilidad son una mayor robustez y los altos que muestran una mayor vulnerabilidad una menor robustez, por consiguiente, se establece que la resta de la unidad menos el valor de salida del método HMC obtenido mediante lógica difusa define la capacidad diagnostica de robustez. Esta relación es consistente con la definición de Cimellaro, Reinhorn y Bruneau (2010), quienes expresan la robustez como la funcionalidad residual inmediatamente después del evento, Robustez = 1 − L, donde L es la pérdida de funcionalidad; en este trabajo la vulnerabilidad obtenida con el método HMC cumple el papel de L.

Después de definir las variables de entrada y salida, se plantearon las reglas de inferencia que se muestran en la Tabla 17, donde se cruzan la condición de riesgo de perfil de suelo, riesgo de localidad, riesgo de edificio y función post desastre para estimar la robustez de la UPL.

Tabla 17 Reglas de inferencia de robustez
Fuente: Información procesada por autores

Variables de entrada				Variable de salida
Riesgo de perfil de suelo	Riesgo de localidad	Riesgo de edificio	Función post desastre	Vulnerable
Piedemonte C	Alto	Alto	Residencial	Alto
			No necesario	Alto
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Alto
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio

		Bajo	Residencial	Alto
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
	Medio	Alto	Residencial	Alto
			No necesario	Alto
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Alto
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
	Bajo	Alto	Residencial	Alto
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Bajo
			Esencial	Bajo
Aluvial 50	Alto	Alto	Residencial	Alto
			No necesario	Alto
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Alto
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
	Medio	Alto	Residencial	Alto
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Medio

			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
	Bajo	Alto	Residencial	Alto
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Bajo
			Esencial	Bajo
Aluvial 100	Alto	Alto	Residencial	Alto
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
	Medio	Alto	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
	Bajo	Alto	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio

		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Bajo
			Esencial	Bajo
Aluvial 200	Alto	Alto	Residencial	Alto
			No necesario	Alto
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Medio
	Medio	Alto	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Medio
			Esencial	Bajo
		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Bajo
			Esencial	Bajo
		Bajo	Residencial	Medio
			No necesario	Bajo
			Necesario	Bajo
			Esencial	Bajo
	Bajo	Alto	Residencial	Medio
			No necesario	Medio
			Necesario	Bajo
			Esencial	Bajo
		Medio	Residencial	Medio
			No necesario	Bajo
			Necesario	Bajo
			Esencial	Bajo
		Bajo	Residencial	Bajo
			No necesario	Bajo
			Necesario	Bajo
			Esencial	Bajo

La estructura del sistema difuso utilizado para la evaluación de la robustez se presenta en la Ilustración 21, donde se muestran las cuatro variables de entrada y la variable de salida definida para el análisis.

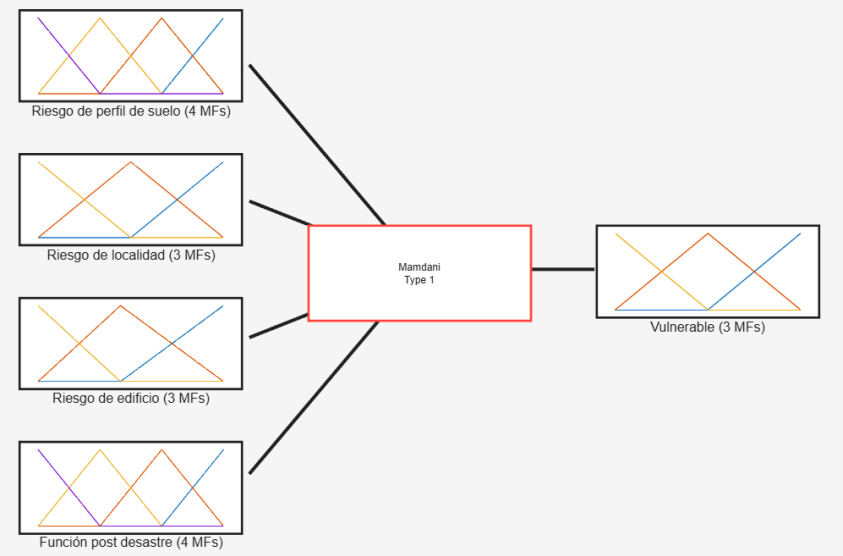


Ilustración 21 Sistema Difuso para cálculo robustez
Fuente: Información procesada por autores

Por último, en la Ilustración 21 se presentan las superficies de control de robustez. Estas permiten ver cómo cambia el resultado final según la combinación de las variables analizadas.

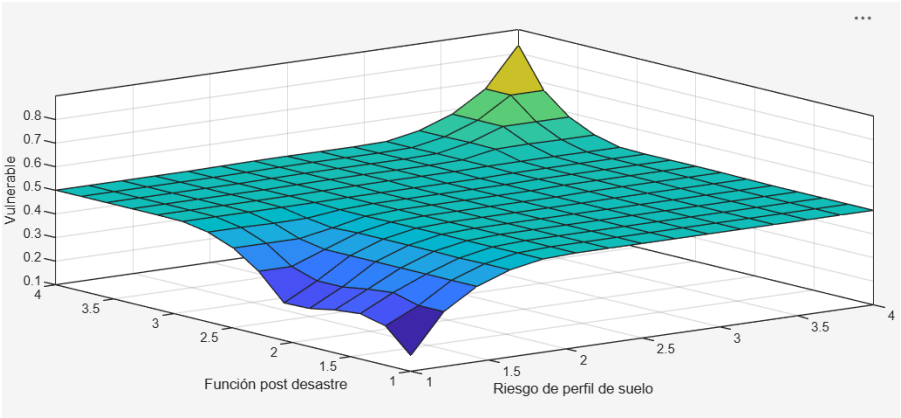


Ilustración 22 Superficie cálculo robustez
Fuente: Información procesada por autores

5.3 CAPACIDAD DE RESILIENCIA

Después de valorar la redundancia, la capacidad de gestión, la respuesta y la robustez, se realizó la integración de estos criterios para estimar la capacidad de resiliencia sísmica de la UPL Tunjuelito, lo cual permitió pasar de los resultados individuales de cada factor a una lectura general del territorio frente a un posible evento sísmico.

Para este cálculo se construyó un sistema difuso final, en el cual las variables de entrada correspondieron a los resultados obtenidos en los criterios anteriores. Así, la redundancia representó la posibilidad de contar con elementos de respaldo en servicios e infraestructura esencial; la capacidad de gestión recogió las condiciones institucionales y organizativas para prepararse y atender una emergencia; la respuesta se relacionó con los recursos físicos y funcionales disponibles para actuar después del evento; y la robustez permitió incorporar las condiciones físicas del territorio frente a la amenaza sísmica.

En el caso de la robustez, se tuvo en cuenta que el sistema desarrollado previamente entregó una valoración de vulnerabilidad. Por esta razón, dentro del modelo final se usó la variable vulnerable, pero su interpretación se hizo en sentido contrario: una vulnerabilidad alta reduce la capacidad de resiliencia, mientras que una vulnerabilidad baja indica una condición más favorable para soportar el evento sísmico.

La variable de salida del sistema fue la capacidad de resiliencia, la cual se valoró en una escala entre 0 y 1, donde los valores más bajos indican menor capacidad del territorio para mantener su funcionamiento, responder y recuperarse, y los valores más altos representan mejores condiciones para enfrentar el evento. Para facilitar la interpretación, la salida se clasificó en tres niveles: baja, media y alta.

Las reglas de inferencia se formularon a partir de la relación entre los cuatro criterios. En términos generales, cuando la vulnerabilidad fue alta, la capacidad de resiliencia tendió a ser baja, incluso si algunos de los demás factores presentaban condiciones favorables. Esto se debe a que una condición física desfavorable puede limitar la respuesta y la recuperación del territorio después del sismo.

La base de reglas incorpora, además, una cuando cualquiera de los cuatro criterios se encuentra en su estado más desfavorable (no redundante, sin capacidad de gestión, sin respuesta o poco robusto), la salida es poco resiliente, sin importar el estado de los demás criterios. Con esta condición se evita que un criterio en falla quede compensado por los otros, lo que es coherente con lo planteado por Bristow y Hay (2017), quienes muestran que la falla de un componente se transmite al resto del sistema urbano a través de sus interdependencias, y con la definición de robustez de Cimellaro, Reinhorn y Bruneau (2010) como la funcionalidad que queda inmediatamente después del evento. Como resultado, 65 de las 81 reglas tienen como salida poco resiliente, 5 medianamente resiliente y 11 resiliente. En un escenario extremo, con tres criterios en su mejor condición y el cuarto en la peor, el índice es 0,837 sin la condición crítica y 0,163 con ella.

Cuando la vulnerabilidad fue media, el resultado dependió más de la combinación entre redundancia, capacidad de gestión y respuesta. En estos casos, la existencia de redes de respaldo, entidades de atención, instrumentos de gestión y espacios de apoyo permitió mejorar la valoración final. Por el contrario, cuando estos factores fueron débiles, la resiliencia se mantuvo en niveles bajos o intermedios.

Finalmente, cuando la vulnerabilidad fue baja, el sistema permitió obtener valores más favorables de resiliencia, especialmente cuando los demás criterios también presentaron buenas condiciones. Esto significa que un territorio con menor fragilidad física, buena respuesta, gestión institucional y elementos redundantes tiene mejores posibilidades de soportar el evento y avanzar hacia la recuperación.

De esta manera, la capacidad de resiliencia no se calculó como una suma simple de factores. El resultado se obtuvo mediante reglas difusas que permitieron representar la interacción entre las condiciones del territorio. Esto fue importante porque la resiliencia sísmica no depende de un único elemento, sino de la forma como se relacionan la infraestructura, los servicios, las instituciones, la población y las condiciones físicas de la UPL.

En la Tabla 18, se presentan las variables empleadas para definir el cálculo de la capacidad de resiliencia mediante lógica difusa; conforme a lo desarrollado en el presente trabajo,

dichas variables corresponden a la redundancia, la capacidad de gestión, la respuesta y la robustez.

Tabla 18 Sistema difuso de entrada de Capacidad de Resiliencia
Fuente: Información procesada por autores

ENTRADA			
Variable lingüística	Conjunto de términos	Universo de discurso	Función de membresía
Redundancia	Redundante	0-100	Trimf [50,100,150]
	Medio Redundante		Trimf [0,50,100]
	No Redundante		Trimf [-50,0,50]
Capacidad de Gestión	Capacidad de gestión	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Regular capacidad de gestión		Trimf [0,0.5,1]
	No tiene Capacidad de gestión		Trimf [-0.5,0,0.5]
Respuesta	Con Respuesta		Trimf [0.5,1,1.5]
	Respuesta regular		Trimf [0,0.5,1]
	No tiene respuesta		Trimf [-0.5,0,0.5]
Robustez	Robusto		Trimf [0.5,1,1.5]
	Robustez media		Trimf [0,0.5,1]
	Poco robusto		Trimf [-0.5,0,0.5]

Asimismo, la Tabla 19 detalla las variables de salida del sistema difuso para el cálculo de la capacidad de Resiliencia.

Tabla 19 Sistema difuso de salida Capacidad de Resiliencia
Fuente: Información procesada por autores

SALIDA			
Variable lingüística	Conjunto de términos	Universo de discurso	Función de membresía
Capacidad de Resiliencia	Resiliente	0-1	Trimf [0.5,1,1.5]
	Medianamente resiliente		Trimf [0,0.5,1]
	Poco resiliente		Trimf [-0.5,0,0.5]

La Tabla 20 presenta las reglas de inferencia empleadas para el cálculo de la capacidad de resiliencia. A partir de estas reglas se obtuvo la salida final del sistema difuso, la cual fue interpretada posteriormente en el capítulo de análisis de resultados.

Tabla 20 Reglas de inferencia Capacidad de Resiliencia
Fuente: Información procesada por autores

Variables de entrada				**Variable de salida**
Redundancia	**Capacidad de Gestión**	**Respuesta**	**Robustez**	**Capacidad de resiliencia**
Redundante	Capacidad de Gestión	Con Respuesta	Robusto	Resiliente
			Robustez media	Resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		Respuesta regular	Robusto	Resiliente
			Robustez media	Resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
	Regular capacidad de gestión	Con Respuesta	Robusto	Resiliente
			Robustez media	Resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		Respuesta regular	Robusto	Resiliente
			Robustez media	Medianamente resiliente

			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
	No tiene Capacidad de gestión	Con Respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		Respuesta regular	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
Medio redundante	Capacidad de Gestión	Con Respuesta	Robusto	Resiliente
			Robustez media	Resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		Respuesta regular	Robusto	Resiliente
			Robustez media	Medianamente resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
	Regular capacidad de gestión	Con Respuesta	Robusto	Resiliente
			Robustez media	Medianamente resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente

		Respuesta regular	Robusto	Medianamente resiliente
			Robustez media	Medianamente resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
	No tiene Capacidad de gestión	Con Respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		Respuesta regular	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
No redundante	Capacidad de Gestión	Con Respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		Respuesta regular	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
			Robusto	Poco resiliente

	Regular capacidad de gestión	Con Respuesta	Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		Respuesta regular	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
	No tiene Capacidad de gestión	Con Respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		Respuesta regular	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente
		No tiene respuesta	Robusto	Poco resiliente
			Robustez media	Poco resiliente
			Poco robusto	Poco resiliente

La estructura del sistema difuso utilizado para la evaluación de la robustez se presenta en lallustración 23, donde se muestran las cuatro variables de entrada y la variable de salida definida para el análisis.

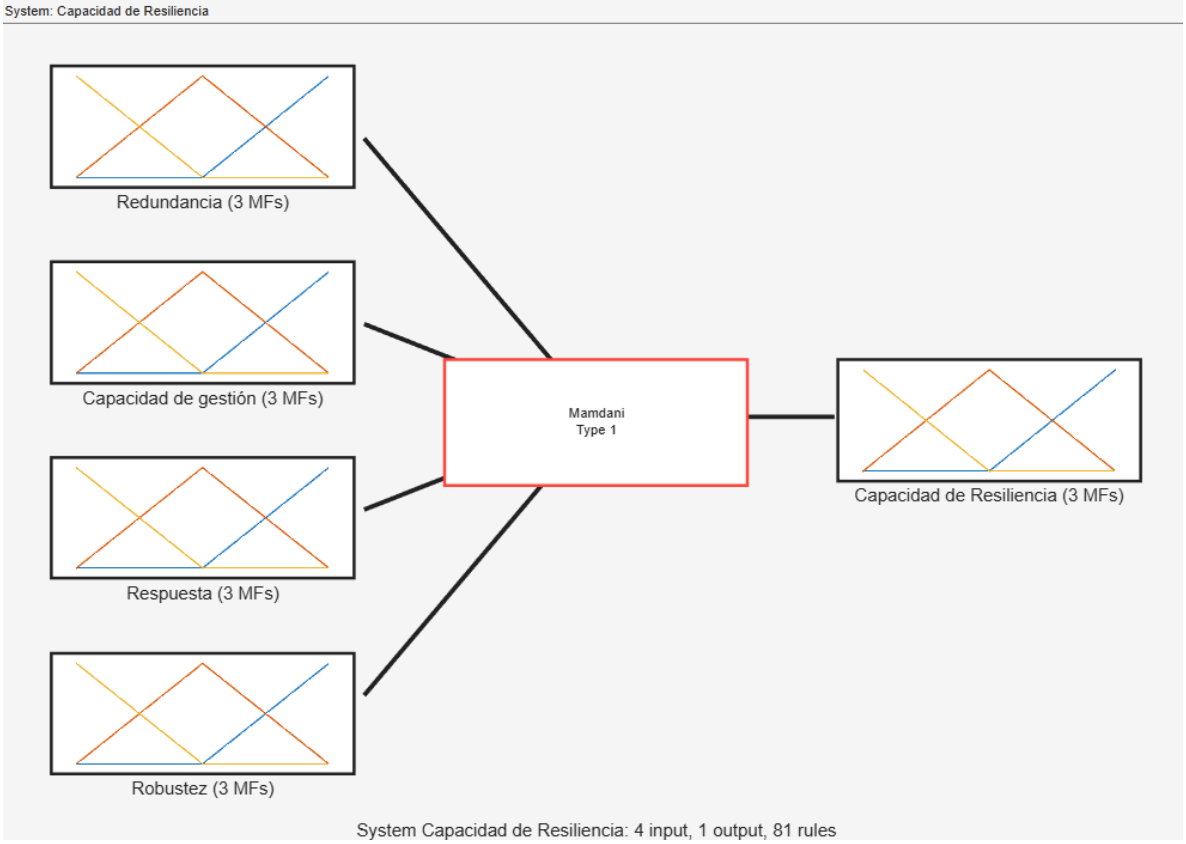


Ilustración 23 Estructura sistema difuso capacidad de Resiliencia
Fuente: Información procesada por autores

Por último, en la Ilustración 21 se presentan las superficies de control de robustez. Estas permiten ver cómo cambia el resultado final según la combinación de las variables analizadas.

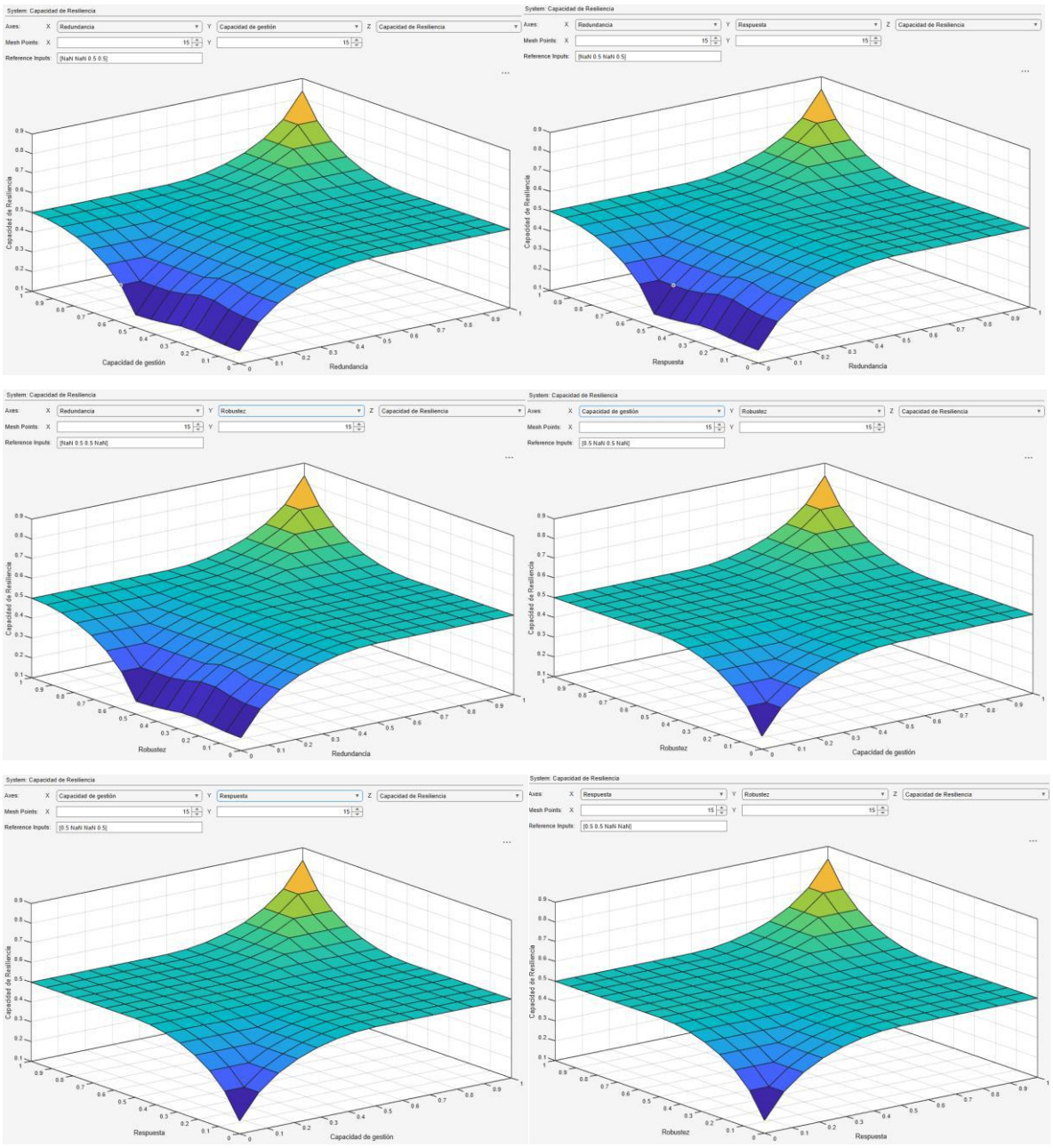


Ilustración 24 Superficie de control Capacidad de Resiliencia
Fuente: Información procesada por autores

5.4 Empleo de Matlab el análisis de las variables con lógica difusa

Para aplicar el modelo de lógica difusa se utilizó MATLAB, por medio de la herramienta Fuzzy Logic Toolbox. Con esta herramienta se construyeron los sistemas de inferencia usados en la investigación, definiendo para cada caso las variables de entrada, la variable de salida, las funciones de pertenencia y las reglas de inferencia.

El uso de lógica difusa se consideró adecuado porque varios factores de la resiliencia no se pueden valorar de forma cerrada, es decir, no siempre es posible decir que una condición es totalmente buena, o totalmente mala; en muchos casos existen niveles intermedios, como ocurre con la capacidad de gestión, la respuesta o la redundancia.

En MATLAB se estructuró un sistema difuso para cada factor evaluado. Primero se ingresaron los sub-factores definidos en la metodología y luego se asignaron las funciones de pertenencia correspondientes, buscando relacionar los valores numéricos de cada indicador con una categoría de análisis. Así, un valor no quedó limitado a una sola clasificación rígida, sino que pudo tener cierto grado de pertenencia a más de una condición.

Después se definieron las reglas de inferencia. Estas reglas indicaron cómo se relacionaban las variables de entrada con el resultado de salida. Su formulación siguió la lógica “si-entonces”, de manera que el sistema pudiera evaluar distintas combinaciones entre sub-factores (DELGADO, 2023). Por ejemplo, cuando varios indicadores presentaban condiciones bajas, la salida del sistema tendía a reflejar una menor capacidad del factor analizado. Cuando las condiciones eran más favorables, el resultado aumentaba.

La herramienta también permitió revisar el comportamiento del modelo mediante el visor de reglas y las superficies de control, lo cual fue útil para verificar si las salidas obtenidas eran coherentes con la interpretación del territorio y con los criterios definidos para cada factor. En los casos en que alguna combinación no representaba de forma adecuada la condición evaluada, se revisaron los rangos o las reglas planteadas.

Otra ventaja de usar MATLAB fue que facilitó el análisis de varias combinaciones sin hacer todos los cálculos de manera manual; lo cual es importante porque los factores de resiliencia estaban formados por diferentes sub-factores, y la interacción entre ellos podía

modificar el resultado final. Así las cosas, el sistema difuso permitió ordenar esas relaciones y obtener un valor de salida para cada componente.

El resultado entregado por cada sistema se obtuvo mediante el proceso de defusificación, con el cual la valoración difusa se transformó en un valor numérico, el cual se utilizó para interpretar el comportamiento de cada factor dentro de la evaluación general de la resiliencia ante eventos sísmicos de la UPL Tunjuelito.

En este trabajo, MATLAB se usó como una herramienta de apoyo para aplicar los criterios definidos en la metodología; por esta razón, los resultados dependen de la información disponible, de los rangos adoptados y de las reglas formuladas. En consecuencia, el modelo debe entenderse como una aproximación diagnóstica y no como una medición absoluta de la resiliencia.

Finalmente, la estructura desarrollada puede ajustarse en futuros estudios. Si se cuenta con información más detallada, se pueden modificar los rangos, agregar nuevos indicadores o calibrar las reglas de inferencia, lo cual permite que la metodología pueda replicarse en otras UPL, siempre que se adapte a las condiciones propias de cada territorio.

5.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para realizar el análisis de sensibilidad se usan en MATLAB los mismos sistemas difusos descritos en los numerales 4.2 y 4.3, sin modificar sus funciones de pertenencia ni sus reglas de inferencia. Se aplica la variación de un factor a la vez donde cada una de las entradas del modelo se aumenta y se disminuye en 10 % y en 15 % respecto a su valor base, mientras las demás se mantienen constantes. Si al aplicar la variación el valor queda por fuera del rango definido para la variable, se toma el valor límite de ese rango. En cada caso se registra el nuevo índice de capacidad de resiliencia y se compara con el valor base.

El rango de ±15 % cubre la incertidumbre de los datos de entrada. Por ejemplo, las coberturas de las redes de acueducto y alcantarillado variaron menos de 0,25 % entre 2017 y 2025 (numeral 5.1). El resultado se considera estable si, dentro de ese rango, la UPL conserva la misma clasificación de capacidad de resiliencia.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 REDUNDANCIA

El diagnóstico de redundancia de obtuvo de aplicar la adaptación del procedimiento de análisis del grafo de la red desarrollado por (Zhang, Miller-Hooks, & Denny, 2015), descrito en el numeral 5.2.1.

El análisis se aplicó sobre las redes disponibles que tenían la configuración nodos + enlaces: alcantarillado pluvial, alcantarillado sanitario, redes de acueducto y malla vial.

- Redes húmedas: La información disponible para descarga y procesamiento, presenta las redes húmedas dentro de la UPL del año 2017, si bien esta información tiene una edad de 9 años, los datos del observatorio ambiental de Bogotá indican que la cobertura de las redes de alcantarillado pluvial, sanitario y de acueducto han tenido variaciones del 0.25% ,0.01% y 0.02% respectivamente desde el 2017 hasta el 2025, Entonces se puede concluir que los datos presentados en las ilustraciones y sobre los que se aplicó la metodología de análisis son datos que representan de una manera muy confiable la configuración de las redes actuales. La información consolidada se presenta en la Tabla 21, donde se relacionan las longitudes de las subredes que componen los sistemas identificados en la zona de estudio según los datos descargados.

Tabla 21. Componentes de las redes de acueducto
Fuente: Información procesada por autores

	Red troncal (km)	Red local (km)	Línea lateral (km)	Sumidero	Pozo
Alc. Pluvial	14,86	62,98	14,86	2849	1552
Alc. Sanitario	7,41	151,11	11,83	-	
	Red matriz	Red menor		Hidrantes	
Acueducto	13,84	169,19	24,13	151,00	

La distribución espacial de estas redes permite conocer la cobertura de los sistemas de alcantarillado pluvial, sanitario y de acueducto. Según datos del observatorio ambiental de Bogotá, para el año 2025 se obtuvieron valores de 99.62%, 99.95 y 99.99% de cobertura respectivamente en la localidad de Tunjuelito. Si bien hay diferencias territoriales entre la UPL y la localidad (1.57 km^2), la medida de cobertura es representativa para hablar desde el dato de la localidad hacia el dato estimado de la UPL. Las siguientes ilustraciones presentan las redes procesadas bajo el ajuste geométrico descrito en el numeral 5.2.1 y a las que se le aplicó el análisis de grafos bajo el script descrito en el mismo numeral. La Ilustración 25 presenta el grafo de la red de alcantarillado pluvial (verde), en él se consideró la información de red troncal, red local y pozos por ser los responsables de la convergencia de la red hacia las descargas y se consideró la línea lateral y los sumideros por ser los árboles finales de la red y responsables de la captación inicial del sistema. Las líneas representan toda la tubería y los puntos representan tanto los pozos como los sumideros.

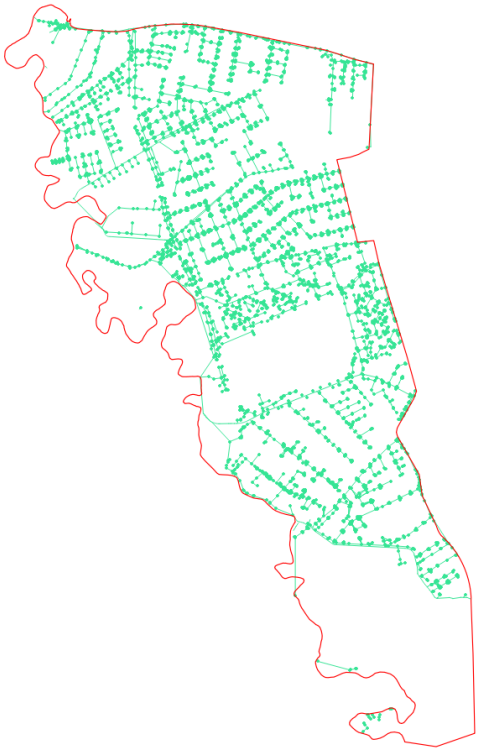


Ilustración 25 Grafo de la red de alcantarillado pluvial
Fuente: Información procesada por autores

La Ilustración 26 presenta el grafo de la red de alcantarillado sanitario (negro), en él se consideró la información de red troncal, red local y pozos por ser los responsables de la convergencia de la red hacia las descargas y se consideró la línea lateral y los sumideros por ser los árboles finales de la red y responsables de la captación inicial del sistema.

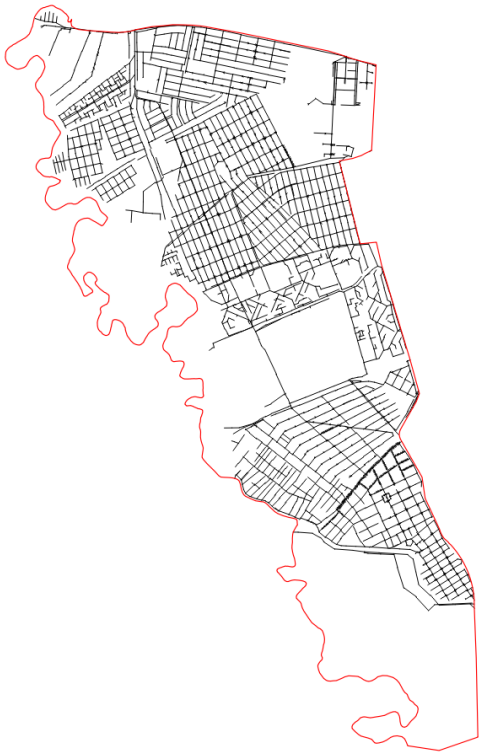


Ilustración 26 Grafo de la red de alcantarillado sanitario
Fuente: Información procesada por autores

La Ilustración 27 presenta el grafo de la red de acueducto (azul), en él se consideró la información de red matriz y la red menor, que son las responsables del suministro local. La red lateral y los hidrantes no se consideraron como parte del suministro de agua potable, aunque estén conectados a la red.



Ilustración 27 Grafo de la red de acueducto
Fuente: Información procesada por autores

En la Ilustración 28 se presenta la malla vial de la UPL conforme a la información disponible del 2025, incluye avenidas principales, y vías locales de los barrios pertenecientes a la UPL:

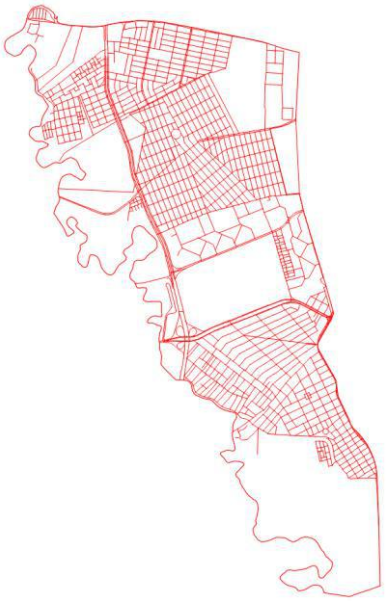


Ilustración 28 Grafo de la malla vial
Fuente: Información procesada por autores

Una vez obtenidos los grafos, se ejecuta el script presentado en el numeral 5.2.1 y se aplican los datos a la ecuación presentada en el mismo numeral, Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 22

Tabla 22 Valores de resiliencia calculada para las redes
Fuente: Información procesada por autores

Variable	Acueducto	Malla vial	Alc. Pluvial	Alc. San
Nodos (v)	1754	1729	3729	4019
Arcos (e)	2565	2575	3767	4475
Subgrafos en el grafo (G)	2	6	45	50
Número Ciclomático (μ)	813	852	83	506
Diámetro (D) [en arcos]	72	90	105	135
Grado Promedio (d)	2.9247	2.9786	2.0204	2.2269
Ciclicidad (ciclos/nodo)	0.4635	0.4928	0.0223	0.1259
Índice Alfa con p (α)	23.24%	24.85%	1.15%	6.50%
Índice Beta (β)	1.4624	1.4893	1.0102	1.1135
Índice Gamma (γ)	48.80%	49.70%	33.69%	37.13
Valor de resiliencia calculado	**69.03**	**69.37**	**69.94**	**70.49**

6.2 CAPACIDAD DE GESTIÓN

La capacidad de gestión se entiende como la forma en que el territorio puede organizarse antes, durante y después de un evento sísmico, lo cual es importante porque la resiliencia no depende únicamente de que las estructuras resistan, sino también de que existan planes, instituciones, información y acciones que permitan atender la emergencia de manera ordenada.

De acuerdo con (DELGADO, 2023) este parámetro se relaciona con la preparación, el manejo de la emergencia y la respuesta del sistema cuando ocurre un evento que afecta su funcionamiento. Para el caso de la UPL Tunjuelito, la capacidad de gestión se analiza a partir de tres aspectos: la existencia de instrumentos de gestión del riesgo, la presencia de entidades u organismos de atención articulados y la estratificación socioeconómica.

Existencia de instrumentos de gestión del riesgo

De acuerdo con el procedimiento planteado en (Benitez & Gómez, 2021) para analizar la capacidad de gestión es necesario identificar las políticas públicas de gestión del riesgo en el entorno. Los autores indican que para la ciudad de Bogotá existe un instituto encargado de velar por la seguridad de los habitantes de la ciudad en aquellos casos que presenten algún tipo de riesgo y que puedan llegar a comprometer la vida de las personas y la integridad de la infraestructura civil que llegue a verse afectada.

La UPL Tunjuelito, se ubica en la zona sur de la ciudad de Bogotá, por ende la existencia de los instrumentos de gestión del riesgo se enmarcan a la política distrital y a lo establecido por el IDIGER que define el riesgo sísmico como las posibles pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, causadas por un sismo que es una de las manifestaciones propias de la dinámica de la tierra, y que se constituye en la amenaza sísmica al encontrar condiciones de vulnerabilidad de las personas, los bienes, la infraestructura o los medios de subsistencia. (GUÍA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DEL IDIGER, 2025)

Ahora bien, el PLAN DISTRITAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES Y DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA BOGOTÁ D.C., 2018-2030, determina la hoja de ruta y se constituye como una guía para orientar las acciones de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres en la ciudad, permitiendo identificar que Bogotá cuenta con una base institucional para prepararse y responder ante emergencias, incluyendo eventos de gran impacto como un sismo.

Esta guía en su capítulo No. 4 Manejo de Emergencias y Desastres (PLAN DISTRITAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES Y DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA BOGOTÁ D.C., 2018-2030), entendido como la preparación de las entidades para atender la emergencia, la preparación comunitaria y del sector privado para la respuesta a emergencias y un plan de preparación para facilitar la recuperación, evidenciando que el distrito además de plantear acciones para responder cuando ocurre el evento, también implementa medidas previas para fortalecer la capacidad de los actores que intervienen en la emergencia antes del evento abrupto.

Para la UPL Tunjuelito, se evidencia la existencia del plan de atención de emergencias en Distrital y el plan Local de Tunjuelito formalizado mediante Decreto Local No. 05 del 18 de noviembre de 2019 *"Por medio del cual se adopta el Plan Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático PLGR – CC de la Localidad de Tunjuelito"* y robusto, que involucra metas definidas en el marco de las tres condiciones antes mencionadas, preparación institucional, preparación comunitaria y preparación para facilitar la recuperación; aterrizando la gestión del riesgo a la escala de la localidad e incluyendo metas relacionadas con la preparación institucional, la preparación comunitaria y la recuperación.

Sin embargo, aunque existe este plan local, se debe tener en cuenta que fue adoptado en el año 2019 y, a la fecha, no se evidencia una actualización ajustada a la nueva organización territorial por Unidades de Planeamiento Local. Esto representa una limitación, ya que han pasado aproximadamente seis años desde su adopción y las condiciones del territorio pueden haber cambiado.

Además de estos instrumentos, el Distrito realiza simulacros anuales, los cuales ayudan a fortalecer la preparación de la ciudadanía y de las entidades frente a posibles emergencias, facilitando la preparación mediante la práctica de rutas de evacuación, puntos de encuentro y formas de reacción ante un evento sísmico.

Según lo identificado en la Ilustración 29, para la UPL Tunjuelito se identificaron los siguientes instrumentos de gestión del riesgo:

1. Simulacros anuales
2. Plan Distrital de gestión de Riesgos
3. Plan Local Tunjuelito

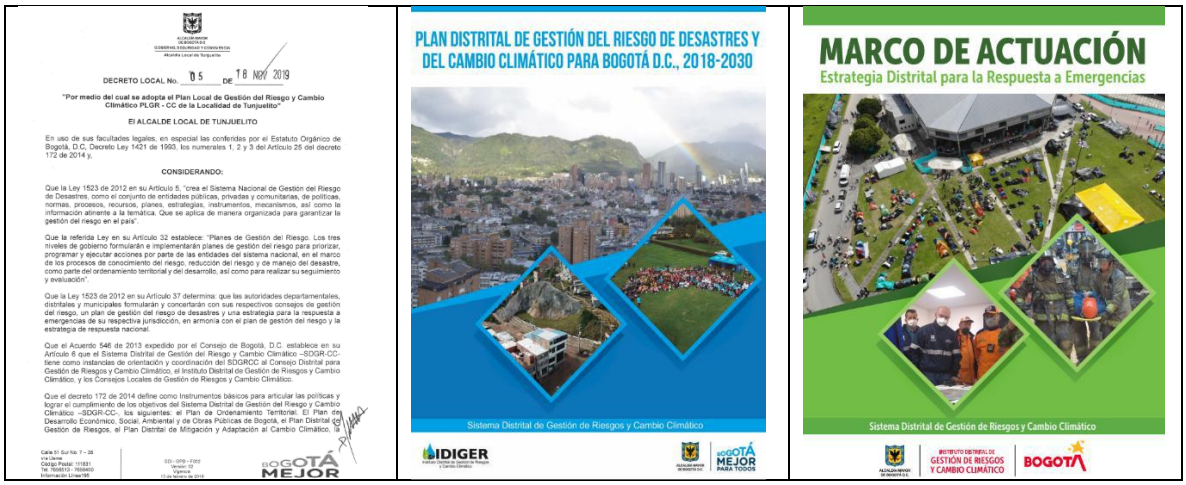


Ilustración 29 Instrumentos de gestión del riesgo

Con base en esta revisión se verificaron las cuatro condiciones definidas en la metodología. El Plan Distrital de Gestión del Riesgo de Desastres y del Cambio Climático 2018-2030 se encuentra vigente, el Plan Local de Tunjuelito fue adoptado mediante el Decreto Local 05 de 2019 y el Distrito realiza simulacros anuales. La cuarta condición no se cumple: no se encontró un instrumento formulado o actualizado para la escala de la UPL, ya que el plan local se adoptó antes de la organización del territorio por Unidades de Planeamiento Local y no registra actualización.

Así las cosas, y de acuerdo con la ponderación definida en la Tabla 23, la cuantificación asignada para este parámetro es de **0,75,** que corresponde a la fracción de condiciones verificadas (tres de cuatro) y se ubica entre los conjuntos Regular y Óptimo.

Tabla 23 Instrumentos de gestión del riesgo

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Optimo	1	Existen instrumentos de gestión de riesgo y se aplican conforme lo planeado en ellos
Regular	0.5	Existen instrumentos de gestión de riesgo, pero no se aplican conforme lo planeado en ellos
No posee	0	No existen instrumentos de gestión del riesgo

Presencia de entidades u organismos de atención

De acuerdo con (Pedreros & Roncancio, 2022), la velocidad de respuesta está definida en función de la cercanía entre las entidades competentes para prestar auxilio. Por esta razón, para este sub-factor se revisó si la UPL Tunjuelito cuenta con organismos y equipamientos que puedan apoyar la atención inicial de una emergencia.

En un sismo, las entidades no actúan todas de la misma forma, ya que la respuesta depende de los daños que se presenten y de las necesidades de la población. Por ello se tuvieron en cuenta diferentes infraestructuras que pueden prestar apoyo en caso de un evento sísmico. De esta revisión se encontró que la UPL cuenta con ocho (8) instituciones de salud, una estación de bomberos y un área destinada a servicios del cuidado y sociales, las cuales se relacionan en la Tabla 24 y en la Ilustración 32.



Centro de Salud El Carmen



Centro de Atención Ambulatoria Tunjuelito



Capital Salud PAU Tunal



Hospital de Tunjuelito



EPS Sanitas Tunal



Unidad de Servicios de salud El Tunal



CAPS San Benito



Hospital Meissen

Ilustración 30 Hospitales y Centros de salud UPL Tunjuelito

Teniendo en cuenta que la UPL está conformada por 38 barrios, la cantidad de centros de salud encontrados muestra un cubrimiento adecuado para una primera atención como se evidencia en la Ilustración 32. Sin embargo, frente a un sismo fuerte, no solo importa que existan estos centros, sino que puedan seguir funcionando, que tengan personal disponible y que las vías para llegar a ellos no se encuentren bloqueadas o afectadas.

En la UPL Tunjuelito se identifica la Estación de Bomberos de Venecia, la cual puede atender incendios, rescates y otras situaciones que se presenten después de un sismo. En ese sentido, la UPL cuenta con organismos que pueden aportar a la atención inicial de la emergencia, aunque su funcionamiento dependerá de las condiciones que se presenten después del evento.



Ilustración 31 Estaciones de bomberos UPL Tunjuelito

Tabla 24. Instituciones de atención a emergencias
Fuente: adaptado por autores

Ícono	nombre	Observación
	Unidad de servicios de salud ambulatoria - Abraham Lincoln	nivel 3
	Unidad de servicios de salud san Benito	nivel 3
	Unidad de servicios de salud nuevo Muzú	nivel 3
	Unidad de servicios de salud el Carmen - salud oral	nivel 3
	Unidad de servicios de salud ambulatoria Tunjuelito	nivel 3
	Unidad de servicios de salud el Carmen - materno infantil	nivel 3
	Unidad de servicios de salud Venecia	nivel 3
	Unidad de servicios de salud el tunal	nivel 3
	Estación de Bomberos de Venecia - John Fernando Galindo Ursuga	Estación B-16, compañía V
	Servicios del Cuidado y Sociales	Área= 31155,16 m^2 68 lotes ocupados

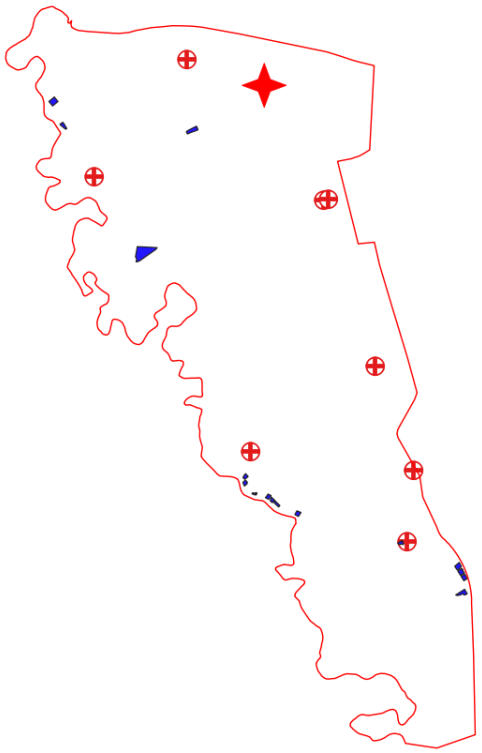


Ilustración 32. Cobertura institucional de emergencias
Fuente: adaptado por autores

De acuerdo con la revisión realizada, la UPL Tunjuelito cuenta con una presencia importante de entidades que pueden apoyar la atención de una emergencia, como centros de salud, hospitales bomberos, además de instituciones no representadas en los mapas, pero de cobertura especial constante como CAI y defensa civil.

Con respecto a la articulación entre entidades, se revisa si las entidades que atenderían una emergencia pueden trabajar de forma coordinada. Para Tunjuelito se encontró que Bogotá tiene una organización general para responder ante emergencias, principalmente a través del Plan Distrital de Gestión del Riesgo y del Marco de Actuación, donde se indican las entidades que participan y algunos espacios de coordinación, lo cual ayuda a la UPL, porque en caso de un sismo no dependería solo de los organismos que están dentro del territorio, sino también del apoyo de otras entidades del Distrito. Aun así, no se encontró información clara sobre una coordinación propia para la UPL Tunjuelito, como rutas recientes, ejercicios por barrios o funciones comunitarias definidas.

Tabla 25 Presencia de entidades u organismos de atención

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Suficiente	1	Existen entidades u organismo de atención dentro de la UPL y están articulados entre ellos
Regular	0.5	Existen entidades u organismos de atención dentro de la UPL, pero no están articulados entre ellos
Deficiente	0	No existen entidades u organismos de atención dentro de la UPL

Ahora bien, partiendo de los criterios definidos en la Tabla 25, se revisaron las cuatro condiciones definidas en la metodología. La UPL cuenta con ocho instituciones de salud y con la Estación de Bomberos de Venecia, y estas entidades hacen parte de la estructura de respuesta del Distrito definida en el Plan Distrital de Gestión del Riesgo y en el Marco de Actuación. En cambio, no se encontró una instancia de coordinación propia de la UPL, como rutas definidas, ejercicios por barrio o funciones comunitarias asignadas. Al cumplirse tres de las cuatro condiciones, este sub-factor se valora en 0,75. Esto es coherente con el hecho de que la disponibilidad de recursos no asegura por sí sola una recuperación rápida si la organización encargada de movilizarlos presenta fallas (Cimellaro, Reinhorn, & Bruneau, 2010).

Condiciones socioeconómicas de la población

Sea lo primero señalar que la evaluación socioeconómica de la población debe ser entendida como un indicador aproximado y no a una medición completa de la resiliencia social.

Ahora bien, las condiciones socioeconómicas de la población permiten entender qué tan fácil o difícil puede ser para una comunidad prepararse y recuperarse después de un sismo, considerando que no todas las personas tienen las mismas posibilidades para reforzar su vivienda, hacer reparaciones, trasladarse temporalmente o asumir pérdidas materiales.

Para la UPL estudiada se tomó como referencia la información de ingresos per cápita, donde se indica un valor cercano a un salario mínimo mensual legal vigente, según datos de 2016. Este dato muestra que una parte importante de la población puede tener una

capacidad económica limitada para responder por cuenta propia ante los daños que pueda causar un sismo.

Se incorporan también los datos de estratificación socioeconómica para plantear una base de estimación de las condiciones de las edificaciones acorde a lo indicado en el enfoque conceptual del DANE “Estratificar con base en las características de las viviendas y su entorno urbano o rural es una opción metodológica fundamentada en que el significante vivienda-entorno expresa un modo socioeconómico de vida demostrable tomando en cuenta las excepciones que lo confirman. Esta opción fue constatada cuando, como resultado de las pruebas estadísticas de variables a considerar en los modelos, se encontró que las características físicas externas e internas de las viviendas, su entorno inmediato y su contexto habitacional y funcional urbano o rural, tienen asociaciones significativas (correspondencia) con las condiciones socioeconómicas de los usuarios de servicios públicos domiciliarios de dichas viviendas.”

En la Ilustración 33 se presenta la distribución espacial de los estratos por manzana, mientras que en la Tabla 26 se muestra la cantidad y porcentaje de manzanas por estrato dentro de la zona estudiada.

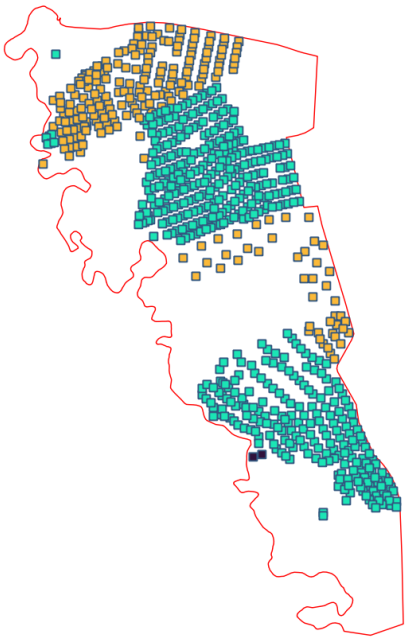


Ilustración 33. Estrato según manzana
Fuente: adaptado por autores

Tabla 26. Distribución de estratos por manzana
Fuente: adaptado por autores

Estrato		Manzanas	%
Estrato 1		2	0,28%
Estrato 2		489	68,30%
Estrato 3		225	31,42%

Estos datos muestran que la UPL está compuesta principalmente por sectores de estrato 2, con una presencia importante de estrato 3. Esto indica que el territorio tiene condiciones socioeconómicas medias y medias-bajas. Aunque la presencia de estrato 1 es muy baja, el predominio del estrato 2 permite pensar que muchas familias podrían necesitar apoyo institucional en caso de una emergencia.

Esto es importante porque, después de un sismo, el problema no termina con el daño en las edificaciones, también se debe revisar qué posibilidades tienen las familias para volver poco a poco a la normalidad; en hogares con ingresos bajos o ajustados, puede ser más difícil pagar arreglos, buscar un lugar temporal para vivir o recuperar los bienes que se hayan perdido.

También se tuvo en cuenta el uso económico del suelo, ya que, si la mayor parte del territorio es residencial, la afectación estaría más relacionada con las viviendas y las familias que las ocupan; pero si hay comercio, industria o servicios, el impacto también podría verse en el cierre temporal de negocios, pérdida de ingresos y dificultad para retomar las actividades diarias.

Con la información revisada, las condiciones socioeconómicas de la UPL se pueden entender como intermedias partiendo de los criterios definidos en la Tabla 27, no se observa una situación crítica, porque el estrato 1 casi no aparece en el territorio y una parte importante de las manzanas pertenece al estrato 3; aun así, tampoco se puede decir que sea una condición alta, ya que la mayoría de las manzanas son de estrato 2 y los ingresos reportados muestran una capacidad económica limitada.

Tabla 27 Condiciones socioeconómicas de la población

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Alta	1	La mayoría de la población está entre los estratos 5 y 6
Media	0.5	La mayoría de la población está entre los estratos 3 y 4
Baja	0	La mayoría de la población está entre los estratos 1 y 2

Con lo anterior, las condiciones socioeconómicas de la UPL Tunjuelito se pueden considerar como medias-bajas. Aunque la mayoría de las manzanas está en estrato 2, también hay una presencia importante de estrato 3 y el estrato 1 casi no aparece dentro del territorio.

Para la cuantificación de este sub-factor se tomó como referencia la escala de estratificación socioeconómica definida en Colombia, compuesta por seis estratos. Bajo este criterio, el estrato predominante se relaciona con su posición dentro de dicha escala; por tanto, al corresponder principalmente al estrato 2, se asigna una valoración de 0,33, resultado de dividir este nivel entre el total de seis estratos considerados.

De esta manera, el sub-factor se clasifica como una condición media-baja, ya que no representa el nivel más crítico de la escala, pero tampoco alcanza una condición socioeconómica media o alta dentro del territorio analizado.

Así las cosas, en la Tabla 28 se presentan las condiciones evaluadas respecto de la capacidad de gestión

Tabla 28 Capacidad de gestión

Variable lingüística	Valoración
Instrumentos de gestión del riesgo	0.75
Presencia de entidades u organismos articuladas	0.75
Estratificación socioeconómica	0.33

Ahora aplicando la lógica difusa de acuerdo con el procedimiento establecido en la metodología, se tiene que la capacidad de gestión es del orden 0.529 conforme se observa en la Ilustración 34.

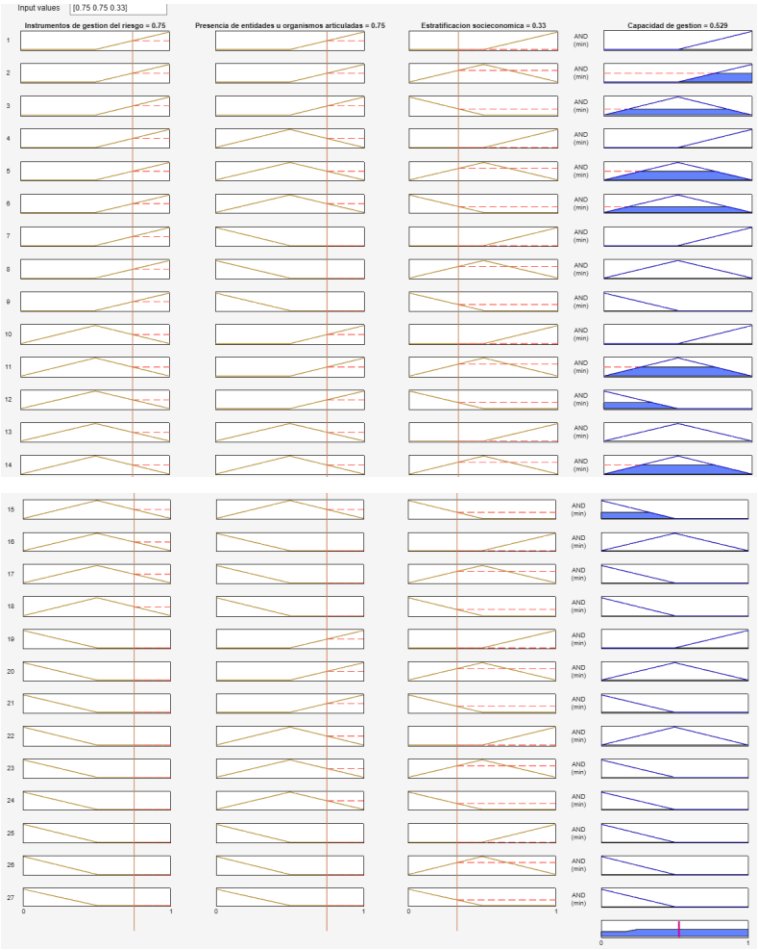


Ilustración 34 Aplicación lógica difusa de capacidad de gestión
Fuente: Información procesada por autores

6.3 RESPUESTA

Como se indicó en el capítulo de metodología, la capacidad de respuesta de la UPL Tunjuelito ante un evento sísmico se evaluó a partir de tres sub-factores: espacios de apoyo comunitario, vías de acceso y cobertura de servicios esenciales. Estos permiten reconocer las condiciones del territorio para atender la emergencia, facilitar la movilidad, apoyar a la población afectada y mantener unas condiciones mínimas de funcionamiento después del evento.

Espacios de apoyo comunitario

Los espacios de apoyo comunitario corresponden a las instituciones, instalaciones y espacios que pueden apoyar la atención inicial de la población ante un evento sísmico. Estos son importantes porque permiten atender personas afectadas, orientar a la comunidad, organizar acciones básicas de emergencia y prestar apoyo mientras se restablecen las condiciones normales del territorio.

Para este análisis se revisaron algunos espacios que, por su función o por sus características físicas, podrían servir como apoyo durante una emergencia, entre ellos los establecimientos educativos y los parques o zonas verdes que podrían funcionar como puntos de encuentro.

- Colegios (Posibles albergues temporales)

En la UPL de Tunjuelito se identificaron sesenta y ocho (68) establecimientos educativos los cuales se relacionan en la Tabla 29, entre colegios oficiales, colegios privados, jardines infantiles y centros de formación. Aunque su función principal es educativa, en una situación de emergencia estos lugares podrían apoyar a la comunidad, siempre que sus condiciones físicas y de seguridad lo permitan.

Estos espacios podrían usarse como puntos de encuentro, lugares de orientación, sitios para entregar ayudas o espacios temporales para ubicar población afectada, lo cual resulta importante porque muestra que la UPL cuenta con varios equipamientos distribuidos en el territorio como puede verse en la Ilustración 35, los cuales podrían apoyar la atención comunitaria después de un sismo.

Sin embargo, su uso como albergue o punto de apoyo no puede asumirse de manera inmediata, ya que primero tendría que revisarse el estado de cada edificación después del evento, así como la disponibilidad de servicios básicos, el acceso al lugar y las decisiones que tomen las entidades encargadas de la emergencia.

Tabla 29 Colegios UPL Tunjuelito
Fuente: Mapas Bogotá

No.	Nombre establecimiento educativo	Sede
1	Colegio centro integral José maría córdoba (IED)	José María córdoba
2	Colegio centro integral José maría córdoba (IED)	santa fe de Bogotá
3	Colegio Venecia (IED)	Venecia
4	Colegio Venecia (IED)	nuevo Muzú
5	Colegio instituto técnico industrial piloto (IED)	piloto
6	Colegio instituto técnico industrial piloto (IED)	nuestra señora de Fátima
7	Colegio instituto técnico industrial piloto (IED)	Fátima colmotores
8	Colegio instituto técnico industrial piloto (IED)	nuestra señora del rosario
9	Colegio Rafael Uribe Uribe (IED)	Rafael Uribe Uribe
10	Colegio Rafael Uribe Uribe (IED)	nuestra señora del Carmen
11	Colegio marco fidel Suárez (IED)	Marco Fidel Suarez
12	Colegio ciudad de Bogotá (IED)	ciudad de Bogotá
13	Colegio ciudad de Bogotá (IED)	Rockefeller
14	Colegio Rufino José cuervo (IED)	Rufino José cuervo
15	Colegio Rufino José cuervo (IED)	Cecilia de la fuente de lleras
16	Colegio Rufino José cuervo (IED)	nuevo Tunjuelito
17	Colegio Rufino José cuervo (IED)	sede d
18	Colegio INEM Santiago Pérez (IED)	INEM Santiago Pérez
19	Colegio INEM Santiago Pérez (IED)	Agustín Codazzi
20	Colegio bernardo Jaramillo (IED)	bernardo Jaramillo
21	Colegio isla del sol (IED)	isla del sol
22	Colegio san Carlos (IED)	José Antonio Ricaurte
23	Colegio san Carlos (IED)	san Carlos
24	Colegio san Benito abad (IED)	Diana Turbay
25	Colegio san Benito abad (IED)	san Benito
26	Liceo del ejercito patria sector sur c (santa bárbara)	Liceo del ejercito patria sector sur c (santa bárbara)
27	Colegio nuestra señora de las victorias	Colegio nuestra señora de las victorias
28	Colegio diego colon	Colegio diego colon
29	gimnasio pedagógico nuestra señora de Fátima	gimnasio pedagógico nuestra señora de Fátima
30	Colegio parroquial san Carlos	Colegio parroquial san Carlos
31	fundación instituto tecnológico del sur	fundación instituto tecnológico del sur
32	Colegio nuestra señora de Fátima polinal	Colegio nuestra señora de Fátima polinal
33	Colegio pedro de Heredia	Colegio pedro de Heredia

No.	Nombre establecimiento educativo	Sede
34	externado Porfirio barba Jacob	externado Porfirio barba Jacob
35	Colegio santa Cecilia de Tunjuelito	Colegio santa Cecilia de Tunjuelito
36	Colegio cooperativo Venecia	Colegio cooperativo Venecia
37	Colegio Méndez	Colegio Méndez
38	Liceo campestre Cafam	Liceo campestre Cafam
39	Colegio cooperativo nuevo Muzú	Colegio cooperativo nuevo Muzú
40	Colegio pro-colombiano	Colegio pro-colombiano
41	gimnasio comercial los andes	gimnasio comercial los andes
42	Liceo damfus	Liceo damfus
43	Jardín infantil mis primeros pasos	Jardín infantil mis primeros pasos
44	Jardín infantil soldaditos	Jardín infantil soldaditos
45	Jardín infantil la isla del sol	Jardín infantil la isla del sol
46	Colegio internacional camino a la cima	Colegio internacional camino a la cima
47	Liceo campo David	Liceo campo David
48	Colegio san José de cafasso	Colegio san José de cafasso
49	Colegio pedagógico juan José Neira	Colegio pedagógico juan José Neira
50	Colegio psicopedagógico procesos creativos	Colegio psicopedagógico procesos creativos
51	Liceo santa Bernardita	Liceo santa Bernardita
52	centro educativo el elyon	centro educativo el elyon
53	Colegio psicopedagógico Arnold Gesell	Colegio psicopedagógico Arnold Gesell
54	Liceo psicopedagógico el teorema de aprender	Liceo psicopedagógico el teorema de aprender
55	Colegio pastorcitos de Fátima	Colegio pastorcitos de Fátima
56	Liceo infantil mi nuevo mundo encantado	Liceo infantil mi nuevo mundo encantado
57	Jardín infantil mis pequeños timpanitos	Jardín infantil mis pequeños timpanitos
58	Liceo integral san Carlos	Liceo integral san Carlos
59	instituto bilingüe del sur	instituto bilingüe del sur
60	Jardín infantil carrusel de colores	Jardín infantil carrusel de colores
61	Colegio incade	Colegio incade
62	Colegio británico	Colegio británico
63	Jardín infantil construyendo con Gepetto	Jardín infantil construyendo con Gepetto
64	centro educativo suramericano	centro educativo suramericano
65	Colegio tecnisistemas	Colegio tecnisistemas
66	centro educativo integral latinoamericano - ceil	centro educativo integral latinoamericano - ceil
67	politécnica colombiana	politécnica colombiana
68	Colegio de la presentación de Fátima	Colegio de la presentación de Fátima

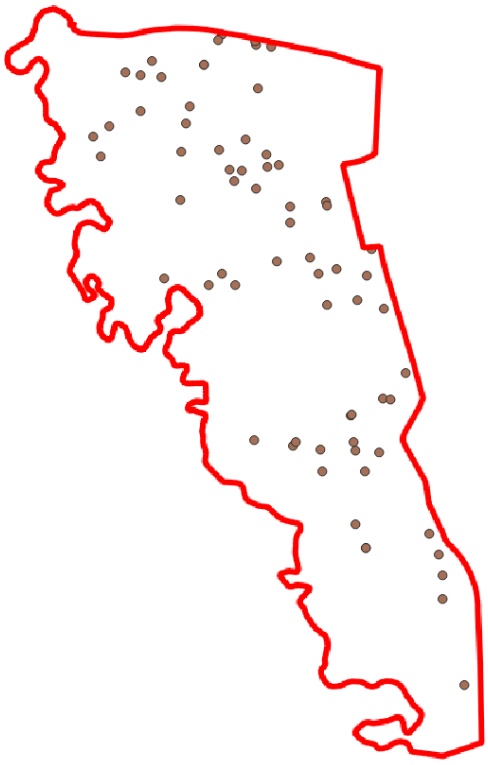


Ilustración 35 Colegios UPL Tunjuelito
Fuente: Mapas Bogotá

- Parques (Posibles puntos de encuentro)

Los parques y zonas verdes también son importantes en una emergencia porque son espacios abiertos. Después de un sismo, pueden servir como puntos de encuentro, zonas de concentración temporal o lugares donde la comunidad pueda recibir información mientras se define la atención correspondiente.

En la UPL de Tunjuelito se identificaron al menos veintinueve (29) parques. Para este análisis se tuvieron en cuenta principalmente los que tienen zonas verdes y áreas amplias como se muestra en la Ilustración 36, ya que estos ofrecen mejores condiciones para recibir personas de manera temporal. Con este criterio, dentro de la UPL se estiman aproximadamente siete (7) parques con características favorables para funcionar como puntos de encuentro o apoyo comunitario.

Estos espacios ayudan a la respuesta inicial porque permiten reunir a la población en lugares abiertos y cercanos a los barrios. Aun así, su uso dependerá de las condiciones posteriores al sismo, del acceso a cada parque y de la forma como se organice la atención en el territorio.

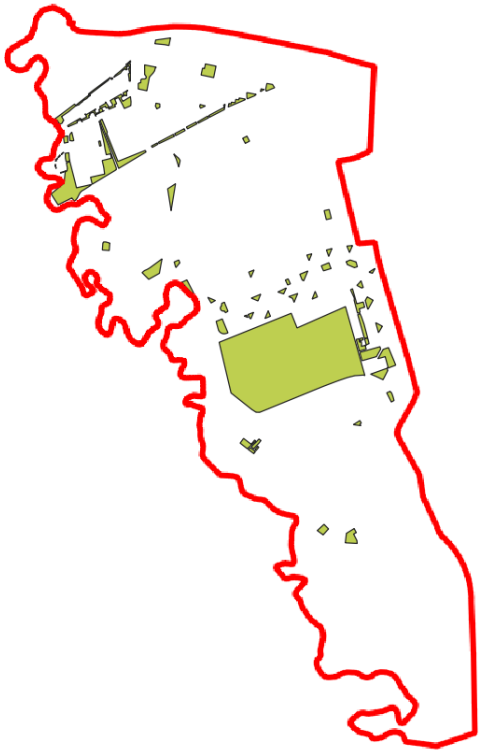


Ilustración 36 Parques UPL Tunjuelito, zonas abiertas
Fuente: Mapas Bogotá

- Otros espacios y organismos de atención

Además de los colegios y parques, en la UPL se identificaron otros equipamientos que pueden apoyar la atención de un sismo. Como se presentó en el capítulo de capacidad de gestión, el territorio cuenta con servicios de salud, estaciones de bomberos y un punto de Defensa Civil, elementos que pueden ayudar en la atención de personas heridas, el control de incendios, el rescate y la orientación de la comunidad.

El Marco de Actuación para la atención de emergencias en Bogotá contempla alojamientos temporales institucionales y ayuda humanitaria para población afectada, lo que indica que

colegios u otros espacios existentes puedan considerarse como apoyo temporal, siempre que sean habilitados para ese fin.

En general, la UPL cuenta con varios espacios que podrían apoyar la respuesta inicial ante un evento sísmico, lo cual evidencia una condición favorable, que no debe entenderse como una garantía absoluta, ya que después del evento algunos equipamientos podrían verse afectados o no estar disponibles; por eso, la respuesta dependerá del estado real de los lugares, del personal disponible, de las vías de acceso y de la organización que se logre durante la emergencia.

Tabla 30 Espacios de apoyo comunitario

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Alta	1,0	Se cuenta con suficientes espacios de apoyo comunitario, distribuidos en la UPL, que pueden servir como puntos de encuentro o apoyo temporal.
Media	0,5	Se cuenta con algunos espacios de apoyo comunitario, pero su cantidad o distribución es limitada.
Baja	0,0	Se cuenta con pocos espacios de apoyo comunitario o estos se concentran en sectores específicos.

Por lo anterior y de acuerdo con la Tabla 30, se asigna un valor de cuantificación de 1,0, ya que la UPL cuenta con una cantidad importante de espacios que podrían apoyar a la comunidad después de un sismo, entre ellos colegios, salones comunales, parques, hospitales, estaciones de bomberos y otros centros de atención. Esta disponibilidad permite clasificar el sub-factor como alto con una valoración de **1.0**.

Vías de acceso

Las vías de acceso son importantes dentro del análisis de respuesta, porque permiten el ingreso de ambulancias, bomberos, policía, maquinaria, personal de apoyo y demás recursos necesarios para la atención de la emergencia. También pueden servir para realizar evacuaciones, trasladar personas afectadas y conectar la UPL con equipamientos localizados en otros sectores de la ciudad.

De acuerdo con la información consultada en el Geo portal del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, SIGIDU, la UPL objeto de estudio cuenta con una buena accesibilidad vial, asociada principalmente a la presencia de vías arteriales como la Autopista Sur y la Avenida Boyacá, las cuales atraviesan el territorio y facilitan la conexión con otros sectores de la ciudad; adicionalmente, la UPL se encuentra próxima a la Avenida Carrera 68 y cuenta con vías secundarias como la Transversal 33, la Carrera 24 y la Carrera 19C, además de una red de vías locales que permite la comunicación interna entre los diferentes barrios del sector. La Ilustración 28 presenta el esquema de malla vial de la UPL

La UPL de Tunjuelito cuenta con 161.06 km de Malla vial de los cuales 35.59 km corresponden a vías tipo avenida (Boyacá, Caracas, Ciudad de Villavicencio, del congreso eucarístico, del sur, General Santander, Jorge Gaitán Cortés, Mariscal sucre y Tunjuelito.

La malla vial identificada es la que se presenta en la Ilustración 28, allí se observa la distribución de las vías principales y locales dentro de la UPL.

Así las cosas, y de acuerdo con el criterio fijado por (Pedreros & Roncancio, 2022) se considera que la UPL presenta una accesibilidad vial suficiente para apoyar la atención de un evento sísmico, dado que cuenta con corredores principales y vías internas que podrían facilitar el ingreso de organismos de emergencia, la evacuación de la población y el traslado hacia equipamientos o zonas de apoyo cercanas.

Tabla 31 Ponderación vías de acceso

Conjunto términos	Valor cuantificación	Concepto
Alta	1,0	La UPL cuenta con vías principales, secundarias y locales que permiten buena conexión interna y externa para la atención de una emergencia.
Media	0,5	La UPL cuenta con algunas vías de acceso, pero presenta limitaciones de conexión, continuidad o distribución en algunos sectores.
Baja	0,0	La UPL presenta pocas vías de acceso o una conectividad limitada, lo que puede dificultar el ingreso de organismos de emergencia y la evacuación.

Para este subfactor se asigna un valor de cuantificación de 1,0, ya que la UPL Tunjuelito cuenta con corredores viales principales como la Autopista Sur y la Avenida Boyacá, además de vías secundarias y locales que permiten la conexión interna entre barrios y la comunicación con otros sectores de Bogotá; esta condición favorece el ingreso de organismos de emergencia, la evacuación de la población y el traslado hacia equipamientos o zonas de apoyo cercanas como se muestra en la Tabla 31

Cobertura de servicios esenciales

La cobertura de servicios esenciales se revisa dentro de la respuesta porque, después de un sismo, no solo importa contar con hospitales, colegios, parques o vías. También se necesita que el territorio tenga acceso a servicios básicos como agua, alcantarillado, energía, gas y comunicaciones, ya que estos permiten atender a la población y mantener unas condiciones mínimas mientras se supera la emergencia.

Según el portal de Cobertura Residencial y Legal del Servicio de Acueducto – CAC, la UPL de Tunjuelito cuenta con una cobertura del 99,7 % en servicios de saneamiento básico para el año 2025 como se evidencia en la Ilustración 37. Este valor también se reporta para las demás UPL de Bogotá, por lo que puede hablarse de una cobertura casi total. Este dato es importante porque, después de un sismo, el saneamiento básico ayuda a mantener condiciones de higiene, permite el uso de baños, reduce posibles problemas de salubridad y facilita la atención en lugares donde se concentre población afectada.

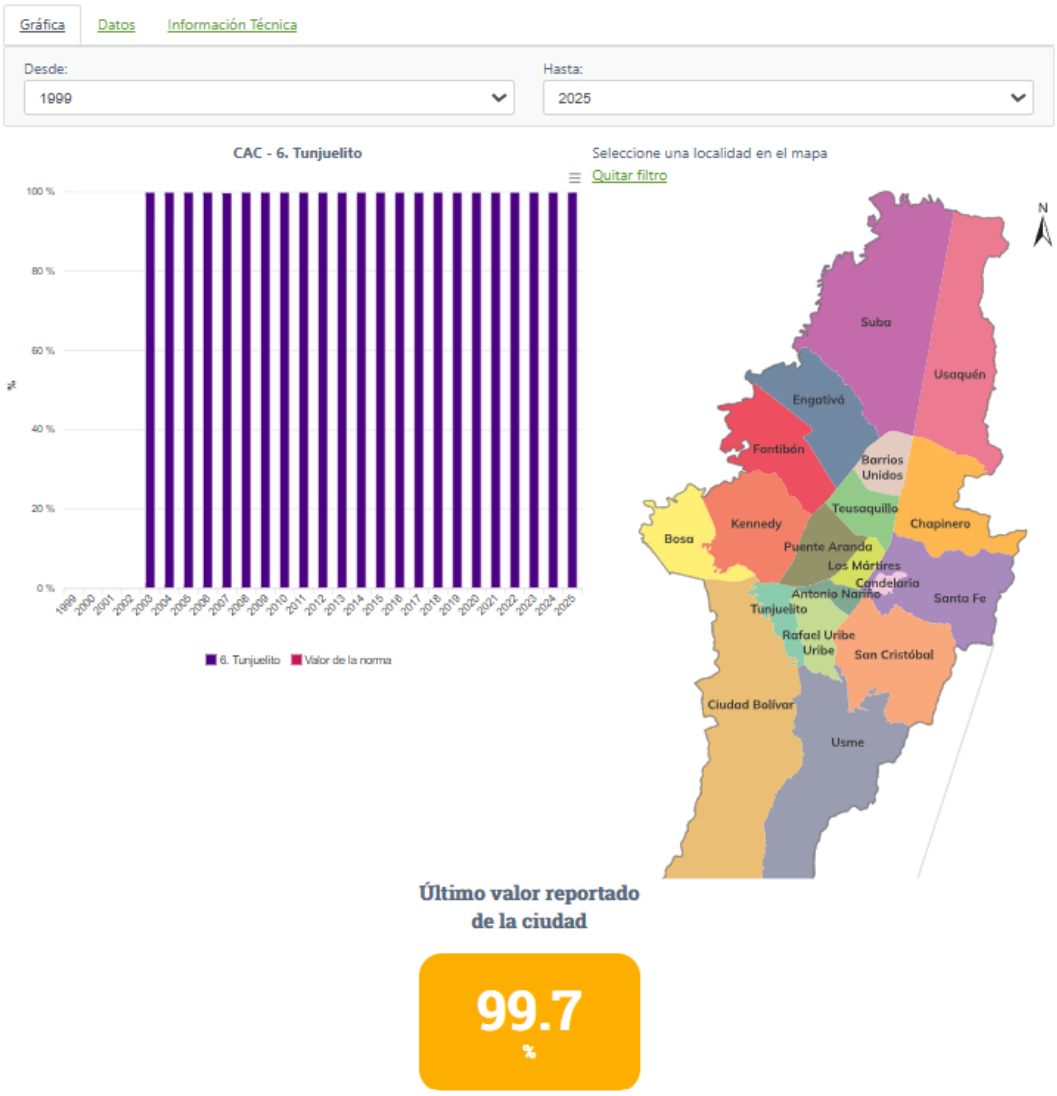


Ilustración 37 Cobertura servicios públicos UPL Tunjuelito
Fuente: Observatorio de Servicios Públicos de la Cámara de Comercio de Bogotá

Esta cobertura también es relevante para los equipamientos que podrían usarse durante la emergencia. Por ejemplo, si un colegio se utiliza como punto de apoyo temporal, necesitaría agua, baños, energía e iluminación; si un centro de salud atiende personas heridas, requiere energía, agua y comunicaciones; y si las entidades deben coordinar la emergencia, necesitan medios de comunicación para reportar daños, orientar a la comunidad y organizar la atención.

Sin embargo, tener una alta cobertura antes del sismo no significa que los servicios funcionen normalmente después del evento. Las redes de acueducto, alcantarillado, energía, gas o comunicaciones pueden verse afectadas por daños físicos o interrupciones temporales. Por eso, en este análisis la cobertura de servicios esenciales se entiende como una ventaja inicial del territorio, pero su aporte real dependerá del estado en que queden las redes después del sismo y de la rapidez con que puedan restablecerse.

En ese sentido, la UPL de Tunjuelito presenta un punto a favor frente a los servicios esenciales, especialmente por la alta cobertura de saneamiento básico y por hacer parte del área urbana consolidada de Bogotá. Esto puede ayudar a la respuesta inicial y a la recuperación temprana después de un sismo, siempre que los servicios mantengan su funcionamiento o puedan recuperarse en poco tiempo.

Tabla 32 Cobertura de servicios públicos

Conjunto término	**Valor**	**Concepto**
Alta	1,0	La UPL cuenta con cobertura casi total de servicios de saneamiento básico, lo que favorece la atención inicial y el funcionamiento básico del territorio después de un sismo.
Media	0,5	La UPL cuenta con cobertura parcial de servicios de saneamiento básico, por lo que algunos sectores podrían presentar limitaciones para la atención inicial.
Baja	0,0	La UPL presenta baja cobertura de servicios de saneamiento básico, lo que puede dificultar la atención de la población y el uso de espacios de apoyo durante la emergencia.

Para este sub-factor se asigna un valor de cuantificación de 1,0, debido a que la UPL Tunjuelito cuenta con una cobertura casi total de servicios públicos esenciales, especialmente en saneamiento básico, donde se reporta una cobertura del 99,7 % y según los criterios definidos en la Tabla 32. Esta condición ayuda a la respuesta inicial, porque permite que viviendas, equipamientos y posibles espacios de apoyo cuenten con servicios básicos después de un sismo, siempre que las redes no presenten daños importantes.

Así las cosas, en la Tabla 33 para el factor de respuesta se tiene un ponderado de:

Tabla 33 Valoración del factor de respuesta

Variable lingüística	**Valoración**
Espacios de apoyo comunitario	1,00
Vías de acceso	1,00
Cobertura de servicios esenciales	1,00

De acuerdo con la revisión realizada, el factor respuesta se valora como alto, ya que los tres sub-factores analizados obtuvieron una calificación de 1,0. Esto se debe a que la UPL Tunjuelito cuenta con espacios que pueden apoyar a la comunidad, vías que permiten la conexión interna y externa, y una cobertura casi total de servicios públicos esenciales. En los términos descritos en el numeral 4.2.3, esta condición corresponde a un territorio que cuenta con recursos disponibles desde el inicio de la emergencia, lo que favorece una recuperación más rápida en sus primeras etapas.

Estos elementos pueden ayudar en los primeros momentos después de un sismo, especialmente para orientar a la población, permitir el ingreso de los organismos de emergencia y mantener unas condiciones básicas de atención. Aun así, este resultado debe entenderse como una valoración previa al evento, porque la respuesta real dependerá de cómo queden los equipamientos, las vías y las redes de servicios después del sismo.

Lo anterior puede corroborarse con la Ilustración 38, donde se aplica la lógica difusa partiendo de los criterios previamente definidos.

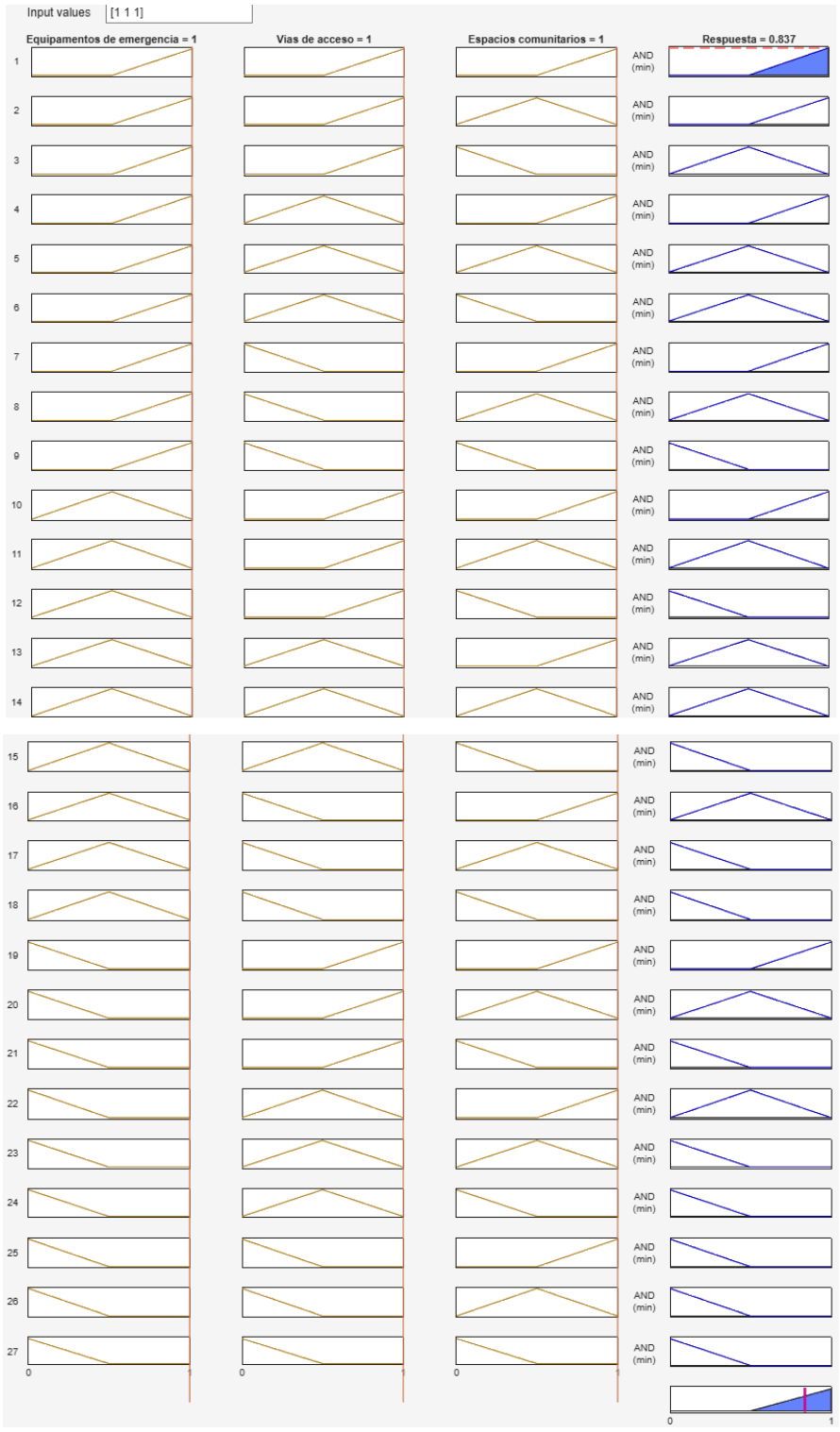


Ilustración 38 Aplicación lógica difusa en respuesta
Fuente: Información procesada por autores

6.4 ROBUSTEZ

Para analizar la robustez se revisa qué tan preparado está el territorio, desde sus condiciones físicas, para enfrentar un evento sísmico sin perder totalmente su funcionamiento. En este caso no se analiza una sola edificación, sino el comportamiento general de la UPL, teniendo en cuenta la respuesta sísmica del suelo, la altura promedio de las construcciones, el uso del suelo y la cantidad de personas que podrían verse expuestas. Por eso se utiliza el método HMC, ya que permite relacionar estas variables y hacer una aproximación al nivel de afectación que podría presentarse. Así, la microzonificación sísmica, el número de pisos y el uso del suelo no se toman como datos aislados, sino como elementos que ayudan a entender qué tan vulnerable o resistente puede ser el territorio frente al sismo analizado.

La evaluación de los 4 factores de vulnerabilidad de la metodología HMC tuvo en cuenta la siguiente información:

La descripción de las zonas de respuesta sísmica del informe final de zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismorresistente de edificaciones emitido por el FOPAE, en el cual se actualizó el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá con base en estudios de amenaza sísmica, información geotécnica, mapas geológicos, modelos de basamento y otros elementos definidos en el documento.

En la tabla 7.1. del documento del FOPAE se presentan los valores de propagación promedio de la onda para cada uno de los perfiles allí estudiados, de los cuales se destacan 175-300 m/s para zonas Aluviales y 300-750 m/s para zonas Piedemonte B y C.

De la información geográfica disponible se tiene que el 89,4% del área total de la UPL corresponde a tipo de suelo Aluvial, con predominio de aluvial 200, y solo un 10,63% del área total correspondiente a piedemonte C, como se presenta en la Tabla 34:

Tabla 34. Datos de respuesta sísmica
Fuente: Datos procesados por autores

Tipo	A_O_475	F_A_475	Sa meseta	% Área
Aluvial 50	0,2	1,35	0,68	8,98%
Aluvial 100	0,18	1,2	0,54	24,67%
Aluvial 200	0,16	1,05	0,42	55,72%
Piedemonte C	0,24	1,8	1,08	10,63%

La NSR-10 en su tabla A.2.4.a define los perfiles de suelo con base en la velocidad media de propagación de la onda en el material, comparando con los valores ya mencionados de propagación en un suelo de tipo aluvial se tiene que el perfil de suelo tipo D cumple con las velocidades de propagación, teniendo valores de entre 180 y 360 m/s.

Los datos del área de la UPL correspondiente a tipo de suelo Piedemonte C cuenta con una velocidad de propagación de onda más rápida, lo cual coincide con los valores determinados para el perfil de suelo tipo C, de la NSR-10. Sin embargo, en la microzonificación de Bogotá esta zona presenta el mayor coeficiente de amplificación (Fa = 1,8) y la mayor aceleración espectral de meseta de la UPL (1,08 g), por lo que la Tabla 13 le asigna el mayor factor de riesgo de suelo. Como ocupa el 10,63 % del área, no define el valor general de la UPL, pero se evalúa como sector crítico al final de este numeral.

El factor de riesgo del perfil de suelo

La tabla 7.2 del documento FOPAE presenta los parámetros Ao, Fa y Fv para el cálculo del espectro de diseño y la obtención de la aceleración horizontal como una fracción de la aceleración de la gravedad. Dicho valor (Sa meseta) se presenta en la Tabla 34 presenta en la Tabla 34:

nuevamente los valores de la zona de Piedemonte C no se toman en cuenta por no abarcar un área representativa dentro del área de análisis.

Por lo anterior, dentro de la metodología HMC el factor de riesgo del perfil de suelo es igual a 1, valor que la Tabla 13 asigna al perfil Aluvial 200. Este perfil ocupa el 55,72 % del área de la UPL y presenta la menor aceleración espectral de meseta entre los perfiles presentes (0,42 g), según la Tabla 34.

Esta calificación no corresponde a una revisión estructural detallada de cada construcción, sino a una aproximación general de la robustez física del territorio.

El factor de riesgo de localidad

El factor de riesgo de localidad se definió teniendo en cuenta la altura predominante de las edificaciones y la aceleración espectral asociada al tipo de suelo principal de la UPL.

Se tiene información de dos grupos de datos: número de pisos por lote y número de pisos promedio por manzana, si bien los datos presentados en la Tabla 35 describen los resultados de analizar la cantidad de pisos de cada lote, para facilidad de visualización se presenta en la Ilustración 39 se presenta el promedio de pisos construidos por manzana.

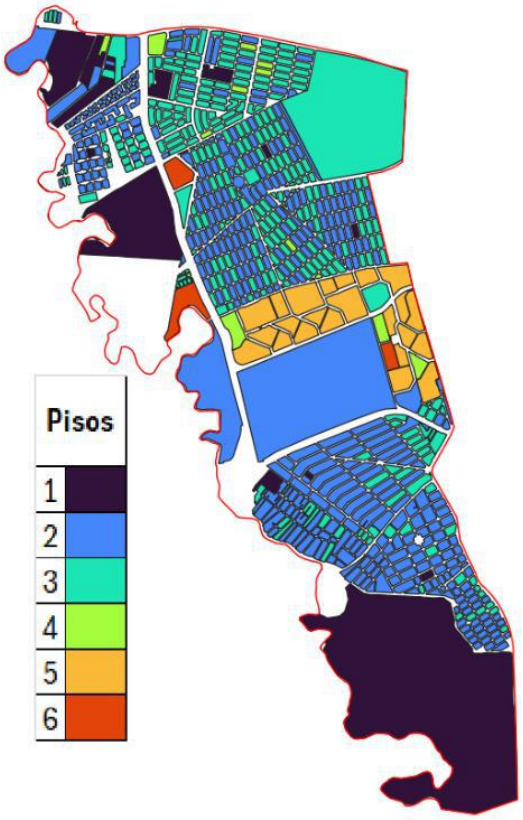


Ilustración 39. Número de pisos promedio por manzana
Fuente: adaptado por autores

Tabla 35. Lotes según número de pisos
Fuente: adaptado por autores

N.º de pisos	N.º de edif.	%
0	10	0,02%
1	22069	40,94%
2	17541	32,54%
3	11208	20,79%
4	2388	4,43%
5	575	1,07%
6	94	0,17%
7	20	0,04%
8	3	0,01%
9	1	0,002%
22	1	0,002%
23	1	0,002%

La Tabla 35 muestra que el 98,69% de las edificaciones dentro de la UPL tienen configuración de entre 1 y 4 pisos, con un total de 53206 registros de lotes

Como se indicó en el numeral 4.2, la UPL tiene 173721 habitantes en las edificaciones censadas, y tomando como referencia la información de cantidad de pisos por Lote (109384 pisos distribuidos en 53911 edificaciones) se tiene una distribución promedio de 1.699 habitantes por piso como densidad habitacional para la zona de estudio, tomando como base también la información de número de pisos por edificación registrada en la Tabla 36.

Tabla 36. Cantidad de habitantes por edificio
Fuente: Datos procesador por autores

N.º de pisos	N.º de edif.	%	Hab* edificio		N.º de pisos	N.º de edif.	%	Hab* edificio
0	10	0,02%	0		6	94	0,17%	10,2
1	22069	40,94%	1,7		7	20	0,04%	11,9
2	17541	32,54%	3,4		8	3	0,01%	13,6
3	11208	20,79%	5,1		9	1	0,002%	15,3
4	2388	4,43%	6,8		22	1	0,002%	37,39
5	575	1,07%	8,5		23	1	0,002%	39,09

Al revisar la distribución de edificaciones por número de pisos, se observa que la mayoría se encuentra entre uno y tres pisos. Este grupo representa más del 94 % de la información analizada, por lo que se tomó como referencia una edificación tipo de dos pisos, al ser representativa de la condición general del territorio.

Para esta edificación se calculó el periodo fundamental aproximado con la expresión T = 0,1N de la NSR-10 (numeral A.4.2), donde (N) corresponde al número de pisos. Así, para una edificación de dos pisos se obtuvo un periodo cercano a (T = 0,2s).

Con este periodo y considerando el suelo Aluvial 200, se revisó el espectro de aceleraciones presentado en la Ilustración 12. De esta lectura se obtuvo un valor aproximado de 0,35 g, que corresponde al valor de entrada del factor de riesgo de localidad en el modelo.

El factor de riesgo de edificio

El factor de riesgo del edificio se definió a partir de la cantidad aproximada de habitantes por edificación. Para esto, se dividió la población censada de la UPL entre el número total de edificaciones identificadas. Como resultado se obtuvo un promedio de 3,2 habitantes por edificación.

El rango del factor de riesgo de edificio en el método HMC inicia en 5 ocupantes (Mena Hernandez, 2002), por lo que el promedio de 3,2 habitantes por edificación queda dentro de la categoría de menor riesgo, representada por el límite inferior del universo de discurso (5).

Factor de riesgo asociado a la función post desastre

El factor de riesgo asociado a la función post desastre se definió a partir del uso predominante del suelo en la UPL. Para esto se revisó la distribución de usos identificada en la información geográfica disponible, donde se observa que el uso residencial ocupa la mayor proporción del territorio.

De acuerdo con los datos procesados, el uso residencial representa el 59,29 % del área analizada. Le siguen el uso dotacional, con el 17,22 %; bodegas, con el 7,60 %; uso industrial, con el 7,43 %; comercio y oficinas, con el 5,63 %; otros usos, con el 2,48 %; y depósitos y parqueaderos, con el 0,34 %.

La información disponible de uso del suelo es la siguiente:

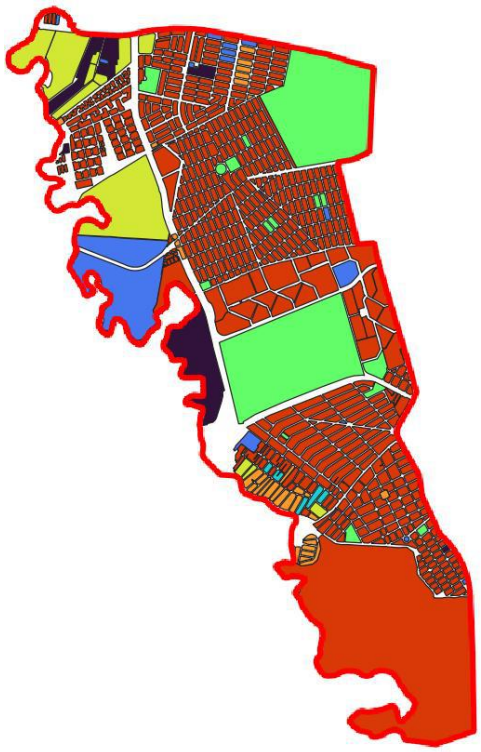


Ilustración 40. Distribución de uso del suelo
Fuente: Mapas Bogotá

Tabla 37. Distribución de uso del suelo
Fuente: Datos procesados por autores

Uso del suelo	**% del área**
Residencial	59,29%
Dotacional	17,22%
Bodegas	7,60%
Industrial	7,43%
Comercio y oficinas	5,63%
Otros	2,48%
Depósitos y parqueaderos	0,34%

Finalmente, después de aplicar la metodología HMC para revisar la vulnerabilidad potencial del área de estudio, se tomaron como base los valores asociados al perfil de suelo, riesgo de localidad, riesgo de edificio y función post desastre, los cuales sirvieron como entrada para el sistema de lógica difusa definido en la metodología.

El resultado obtenido mediante HMC permitió tener una primera lectura de las condiciones físicas de la UPL, pero no se tomó como el valor final de robustez; lo cual se debe a que la metodología HMC está orientada a valorar vulnerabilidad, mientras que en este trabajo la robustez se interpreta como la capacidad contraria, es decir, como la posibilidad de soportar el evento sísmico sin perder totalmente la funcionalidad.

De acuerdo con los datos procesados, la UPL Tunjuelito presenta predominio de suelo Aluvial 200, edificaciones principalmente de baja altura, baja ocupación promedio por edificación y uso del suelo mayoritariamente residencial; dichas condiciones fueron ingresadas al modelo en MATLAB para evaluar su interacción mediante las reglas de inferencia definidas previamente.

La aplicación del sistema difuso arrojó un valor de vulnerabilidad de 0,386, como se evidencia en la Ilustración 41. Dado que una mayor vulnerabilidad implica una menor robustez, el resultado se interpretó como su complemento; por lo tanto, la robustez estimada para la UPL Tunjuelito fue de 0,614.

Para identificar el sector de menor robustez, el mismo sistema se aplicó a la zona Piedemonte C de la Ilustración 11, con factor de suelo 4 y riesgo de localidad de 0,6 g, que es el límite superior del universo de discurso, ya que la aceleración de meseta de esta zona (1,08 g) lo supera. La vulnerabilidad del sector es 0,837 y su robustez 0,163, frente a 0,614 del conjunto de la UPL. Aun con la misma aceleración de 0,35 g usada para el resto del territorio, la robustez del sector sería 0,500. Por tanto, la zona Piedemonte C es el sector de menor robustez de la UPL Tunjuelito, debido a la mayor amplificación espectral del suelo en esa zona.

Este resultado corresponde a una condición media de robustez, lo cual indica que la UPL no presenta una situación crítica generalizada frente al escenario sísmico analizado, pero tampoco puede considerarse altamente robusta. En consecuencia, el valor obtenido debe entenderse como una aproximación territorial, útil para identificar sectores o edificaciones que podrían requerir una revisión más detallada.

Cuantificar el daño inducido por sismo, la respuesta estructural y la resiliencia en grandes cantidades de edificaciones plantea un desafío importante, principalmente por los recursos

computacionales y la información detallada que se requiere. Por esta razón, el uso de metodologías descriptivas apoyadas en lógica difusa permite obtener una estimación inicial del comportamiento sísmico del territorio, sin reemplazar los estudios estructurales específicos.

(De Iuliis, Kammouh, & Cimerallo, 2022) presentó un análisis de resiliencia basado en lógica difusa, tomando variables del marco PEOPLES dentro de la dimensión de infraestructura física, donde se obtuvo un valor de índice de 0.73. Allí se indica que, si se desea establecer un índice de resiliencia de toda la comunidad, los parámetros de funcionalidad y tiempo de recuperación de otras dimensiones PEOPLES deben evaluarse de manera similar y combinarse de la misma manera que la presentada en el trabajo.

(Chaves, Cardoni, Cimerallo, Delso Murcia, & López Almanza, 2026) presentaron una evaluación de resiliencia ante eventos sísmicos basada en grandes lotes de edificios basada en clustering. Allí se analizó una ciudad virtual donde más del 90% del inventario se tomó de información de bases de datos públicas y estudios de campo de la ciudad de Turin, Italia. Los valores de resiliencia oscilaron entre 22% y 77.5% dependiendo del tipo de edificio.

Aplicando la lógica difusa se obtiene un valor de vulnerabilidad de 0.386 como se evidencia en la Ilustración 41.

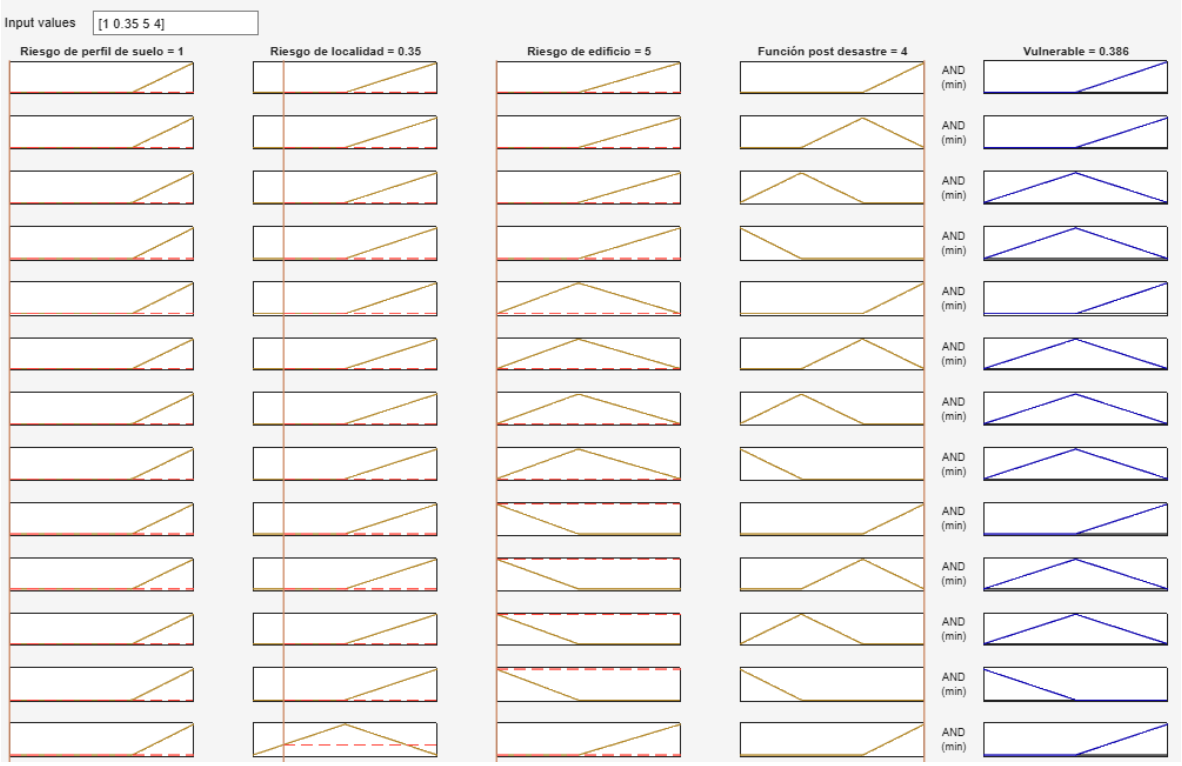


Ilustración 41 Aplicación de lógica difusa criterio de robustez

A partir de este resultado y de la relación Robustez = 1 − L descrita en el numeral 4.2.4, la robustez de la UPL es 1 − 0,386 = 0,614.

6.5 Capacidad de Resiliencia

La capacidad de resiliencia se obtuvo a partir de la integración de los cuatro criterios analizados: redundancia, capacidad de gestión, respuesta y robustez. Esta integración permitió revisar la UPL Tunjuelito de manera general, entendiendo que la resiliencia no depende de un solo factor, sino de la relación entre las variables seleccionadas.

De acuerdo con la Tabla 38, la redundancia obtuvo una valoración de 69,7 , la capacidad de gestión de 0,529, la respuesta de 0,837 y la robustez de 0,614. Estos valores muestran que la UPL tiene una mejor condición en la respuesta, principalmente por la presencia de vías, equipamientos, espacios de apoyo y cobertura de servicios públicos. En cambio, la

capacidad de gestión y la robustez se mantienen en un nivel medio, lo que indica que existen condiciones favorables, pero también aspectos que pueden limitar el funcionamiento del territorio después de un sismo. La redundancia se expresa en la escala de 0 a 100 de la ecuación de Zhang, Miller-Hooks y Denny, mientras que los demás criterios están en la escala de 0 a 1. En el caso de la respuesta, 0,837 es el valor más alto que puede entregar su sistema difuso, porque el conjunto de salida superior es un triángulo con vértice en 1 y la desfusificación por centroide no alcanza ese extremo; por tanto, el resultado indica que los tres sub-factores de respuesta están en la condición más favorable del modelo.

Tabla 38 Capacidad de Resiliencia
Fuente: Información procesada por autores

Variable lingüística	Valoración
Redundancia	69,7
Capacidad de Gestión	0.529
Respuesta	0.837
Robustez	0.614

Al ingresar estos valores en el sistema difuso final, la UPL Tunjuelito obtuvo una capacidad de resiliencia de 0,539 y se clasificó como medianamente resiliente, como se evidencia en la Ilustración 42, lo cual quiere decir que el territorio cuenta con elementos que pueden apoyar la atención y recuperación después de un evento sísmico, pero no alcanza una condición alta de resiliencia, ya que todavía requiere fortalecer algunos componentes.

En particular, el resultado muestra la necesidad de mejorar la articulación institucional a escala de UPL, actualizar los instrumentos de gestión del riesgo, revisar con mayor detalle las edificaciones y equipamientos que pueden ser esenciales durante una emergencia, y mantener información actualizada sobre redes, vías y espacios de apoyo.

Por lo anterior, el resultado debe entenderse como una aproximación diagnóstica y no como una medición exacta del comportamiento de la UPL ante un sismo. De igual forma, la clasificación obtenida permite identificar que Tunjuelito tiene una base favorable para responder, pero también presenta condiciones que pueden afectar su recuperación si no se atienden de manera previa.

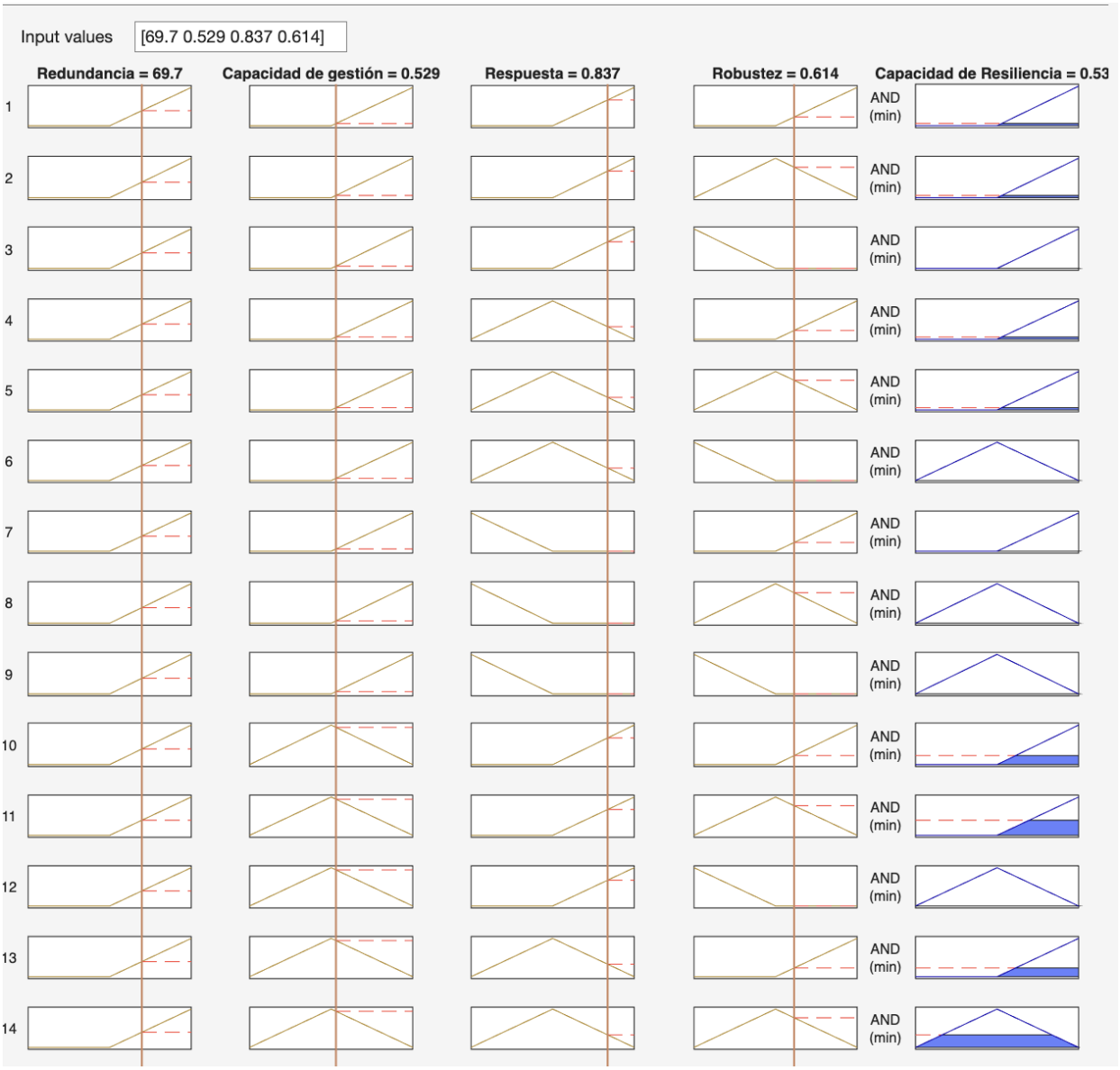


Ilustración 42 Aplicación lógica difusa de capacidad de resiliencia
Fuente: Información procesada por autores

6.5.1 Análisis de sensibilidad

Siguiendo el procedimiento del numeral 4.5, la Tabla 39 presenta el valor del índice de capacidad de resiliencia al variar un factor a la vez; el índice base es 0,539.

Tabla 39 Variación del índice de capacidad de resiliencia con un factor a la vez
Fuente: elaboración propia a partir de los sistemas difusos del modelo

Variable	−15 %	−10 %	+10 %	+15 %
Redundancia	0,514	0,517	0,571	0,592
Capacidad de gestión	0,539	0,539	0,539	0,539
Respuesta	0,540	0,543	0,539	0,539
Robustez	0,539	0,539	0,539	0,542

En todos los casos la UPL se mantiene en la clasificación de medianamente resiliente, con valores del índice entre 0,514 y 0,592. La redundancia es la variable con mayor efecto: con −15 % el índice baja a 0,514 y con +15 % sube a 0,592. La capacidad de gestión, la respuesta y la robustez producen cambios menores a 0,005.

Esto indica que el diagnóstico obtenido es estable: una variación de hasta 15 % en cualquiera de las variables de entrada, por ejemplo, por la fecha de actualización de la información, no cambia la clasificación de la UPL. También muestra que el resultado depende principalmente de la redundancia de las redes, mientras que cambios moderados en la capacidad de gestión, la respuesta y la robustez casi no se reflejan en el índice.

6.6 Efectos del sismo del 10/08/2026 sobre la UPL vs estimación de resiliencia

El 10/08/2026 a las 07:34 am ocurrió un sismo con magnitud 7.4 en la escala de magnitud de momento, con epicentro cerca del municipio de San José del Palmar, Chocó (coordenadas 4.99, -76.29) y una profundidad de 103 km. La información proporcionada por el servicio geológico colombiano (SGC) presenta un informe detallado del registro del evento (*SGC*. (s. f.). https://www.sgc.gov.co/detallesismo/SGC2026pqqmro/origen) con un total de 119 estaciones con registro y 208 fases del evento. La aceleración pico registrada (PGA) fue de 283.02 cm/s^2, y el espectro de respuesta registrado para las dos mediciones

de aceleración más grandes, registraron valores de Sa que rondan la unidad, como se muestra en la Ilustración 43 según lo presentado por (Arroyo, y otros, 2026)

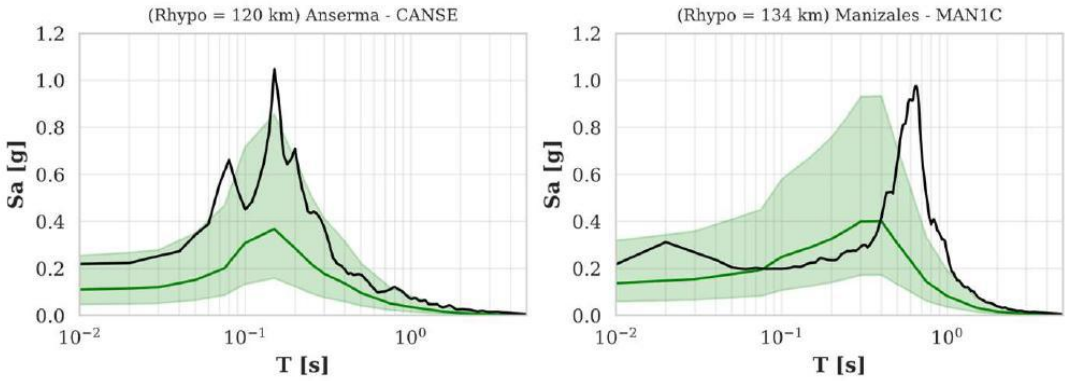


Ilustración 43 Espectros de respuesta Anserma y Manizales

5% de amortiguamiento, obtenidos a partir de la media geométrica de las componentes horizontales registradas en las estaciones. Las líneas verdes representan las estimaciones medianas del movimiento fuerte para sismos de referencia según la bibliografía y las áreas sombreadas corresponden al intervalo de una mediana operada con desviación estándar

Fuente: (Arroyo, y otros, 2026)

El IDIGER únicamente presenta el registro del evento como infografía en su página principal, según lo mostrado en la Ilustración 44:

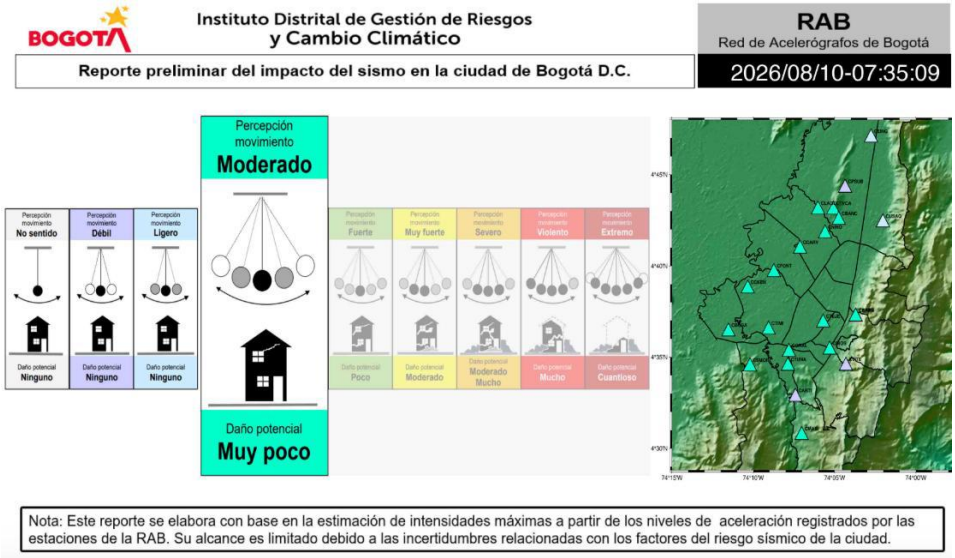


Ilustración 44 Reporte preliminar del impacto del sismo en la ciudad de Bogotá D.C

Fuente: IDIGER

Si bien los datos de aceleraciones pico registradas en las estaciones dentro de la UPL estudiada siguen sin estar disponibles al momento de la redacción de este capítulo, de los registros disponibles en la página del SGC se tienen las siguientes estaciones cerca de Bogotá, indicadas en la Ilustración 45:

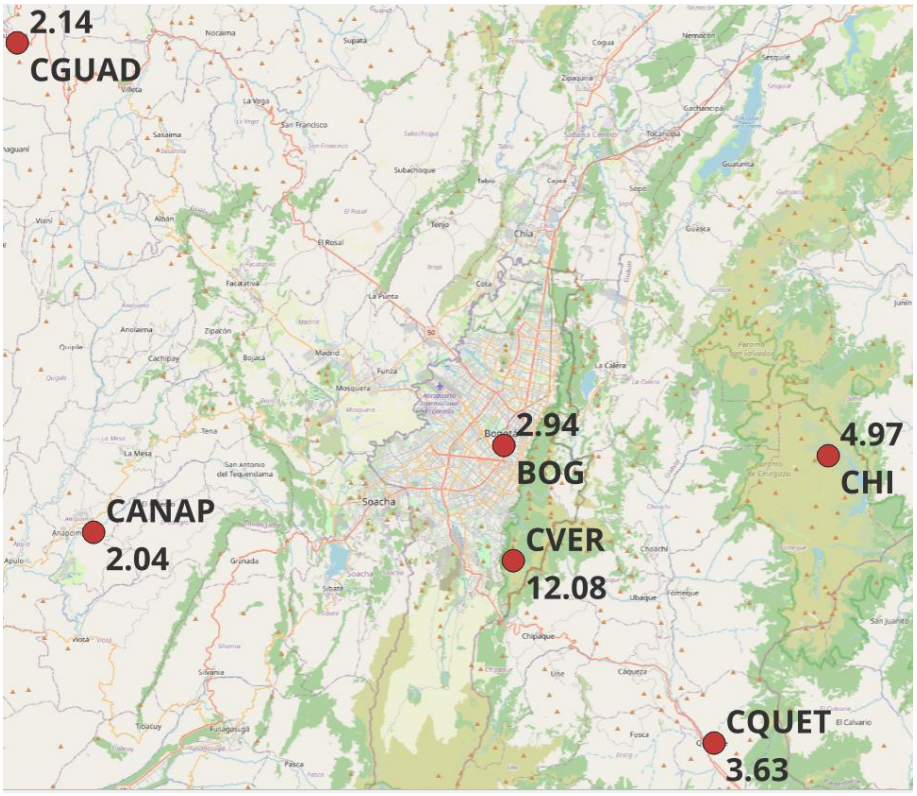


Ilustración 45 Aceleraciones pico registradas cerca de Bogotá
(Unidades en cm/s^2)
Fuente: Adaptado de SGC

Esto, junto al mapa de sacudida basado en información del USGS configuran hasta el momento el escenario sísmico consecuente en Bogotá por cuenta del sismo de San José del Palmar mostrado en la Ilustración 46. En éste se evidencia que la intensidad percibida fue moderada, causando pocos daños que resulten importantes para la afectación de infraestructura tanto vital como común.

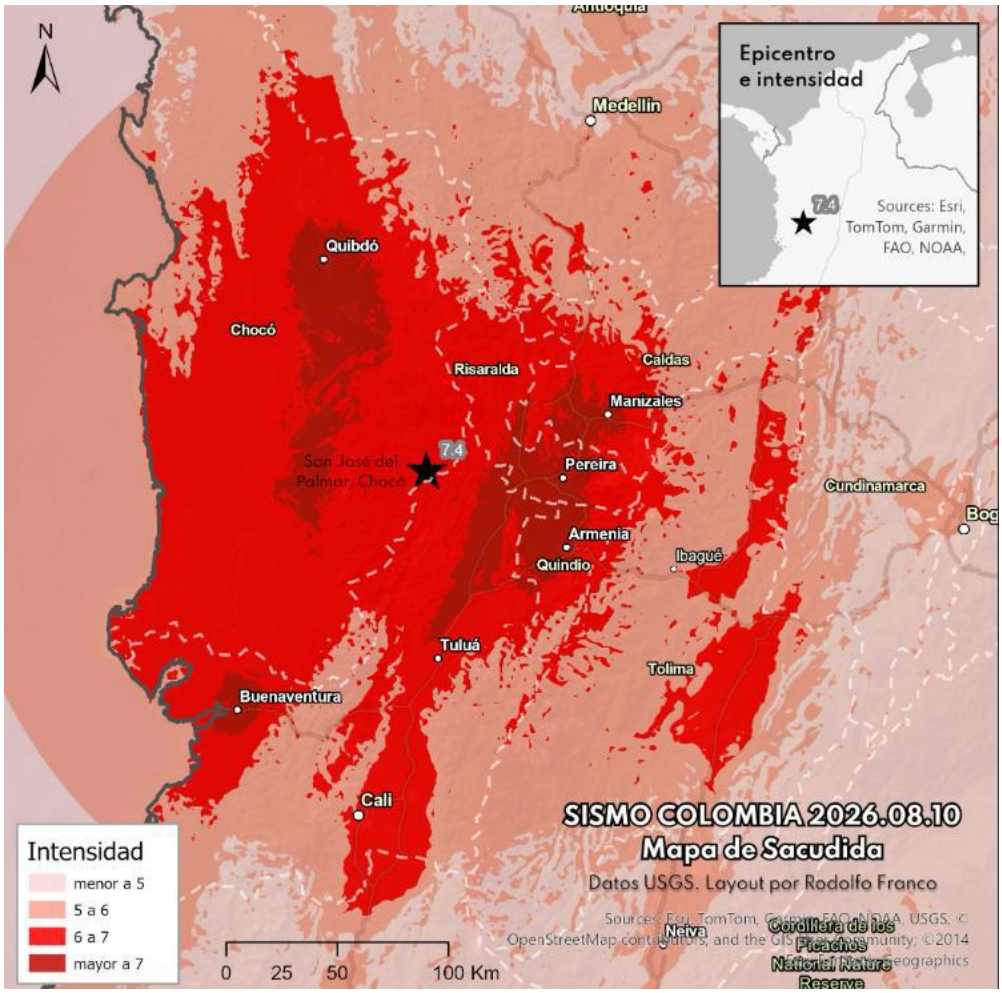


Ilustración 46 Mapa de sacudida, sismo 10/08/2026
Fuente: https://rodolfofrancoweb.com/geodata/geodata_mundial/geodata-geologica/geodata-terremotos/

Debido a lo reciente del suceso, no es mucha la información oficial que se tiene porque las entidades están centrando sus esfuerzos en la atención a víctimas, rescate de personas atrapadas y gestión de damnificados en las áreas afectadas, de modo que el volumen inicial de datos está mayormente representado en boletines de prensa que recogen declaraciones de funcionarios en campo y de los resúmenes de observación realizados por otros actores en los lugares afectados.

La información recopilada por la alcaldía el día del sismo, indicó 134 reportes ciudadanos, relacionados principalmente con grietas y afectaciones en elementos no estructurales de

edificaciones. Como medida preventiva, el IDIGER desplegó equipos de ingeniería en toda la ciudad para chequear infraestructura vital y atender los llamados ciudadanos ya mencionados. Las declaraciones del alcalde indicaron que “no se han reportado daños estructurales, solo algunas grietas que no ponen en riesgo la estructura de los edificios”, según lo reportado por Caracol Radio.

La prensa también presentó material audiovisual recolectado en la zona de Mazuren, al norte de Bogotá, que muestra afectaciones en un nodo Columna placa y grietas que aparentan mostrar el desplazamiento de elementos conectados a una junta de dilatación, la Ilustración 47 muestra un cuadro del video donde se muestra esta afectación.



Ilustración 47 Afectaciones en el conjunto San Pedro 2, Mazuren, Bogotá
Fuente: https://www.elespectador.com/bogota/temblor-10-de-agosto-en-bogota-hasta-ahora-no-se-registran-graves-afectaciones/

El balance oficial posterior al evento permite hacer un primer contraste con los resultados obtenidos para la UPL. Según el balance del IDIGER (2026), con corte a las 10:30 p. m. del 10 de agosto se habían recibido 240 llamadas relacionadas con la verificación de edificaciones, de las cuales se atendieron 150, para un total de 4.796 unidades habitacionales verificadas. Tunjuelito fue una de las diez localidades con reportes de novedades, y el balance técnico no identificó afectaciones estructurales moderadas ni severas que comprometieran la ocupación o la habitabilidad de las unidades revisadas. La Secretaría Distrital de Salud no reportó afectaciones estructurales en la red hospitalaria ni afectaciones mayores en los organismos de seguridad y respuesta (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2026), y la revisión inicial de los colegios oficiales encontró fisuras que requerían evaluación, pero no afectaciones graves (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2026).

Frente a los criterios evaluados, estos hechos muestran lo siguiente. En robustez, la ausencia de daño estructural en Bogotá ante una demanda moderada es coherente con el valor de 0,614 obtenido para la UPL, aunque el evento no alcanzó la demanda de diseño y, por tanto, no pone a prueba la robustez frente al sismo de referencia de la microzonificación. En respuesta, que es el criterio mejor valorado (0,837), el sistema distrital se activó la misma mañana del evento y verificó miles de unidades habitacionales durante el primer día, sin afectaciones estructurales en la red hospitalaria ni afectaciones mayores en los organismos de respuesta. En capacidad de gestión, la coordinación funcionó a escala distrital y local, que corresponde a las tres condiciones verificadas para la UPL, mientras que la información del evento se reportó por localidad y no por UPL, lo que coincide con la condición de que no se cumple: la ausencia de una instancia de coordinación a la escala de la UPL. En redundancia, los reportes oficiales consultados no registran interrupciones en las redes de acueducto y alcantarillado ni en la malla vial de la ciudad, de modo que el evento no exigió la capacidad de respaldo de las redes y no permite contrastar este criterio.

6.7 Efectos del sismo del en el eje cafetero y el valle del cauca

Conforme la información presentada en el numeral 6.6, y el mapa de intensidades macro sísmicas presentados por el SGC (Ilustración 48) se pueden presentar datos importantes

que sirven como punto de partida para la identificación de variables de estudio en la resiliencia:

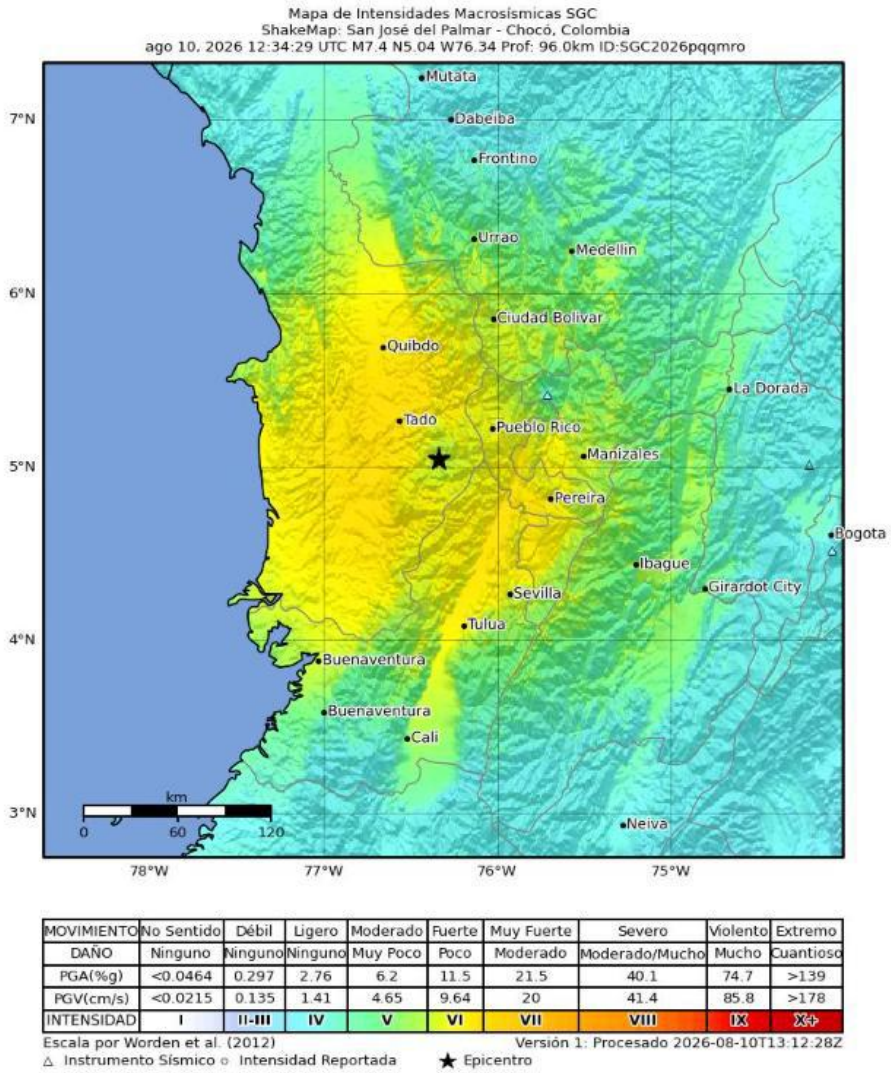


Ilustración 48 Mapa de intensidades macrosícmicas 10/08/2026
Fuente: https://www.sgc.gov.co/detallesismo/SGC2026pqqmro/mmi

El reporte del puesto de mando unificado nacional del 13 de agosto indicó las siguientes estadísticas en declaraciones del director general de la unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres (UNGRD):

Tabla 40 Reporte del PMU 13/08/2026
Fuente: UNGRD

Familias afectadas	40753
Personas afectadas	97515
Fallecidos	273
Heridos	3824
Desaparecidos	377
Animales afectados	242
Viviendas destruidas	12584
Viviendas averiadas	74873
Edificios colapsados	172
Centros educativos afectados	2198
Centros comunitarios afectados	825
Centros de salud afectados	216
Acueductos afectados	71
Aeropuertos afectados	5

Observando este panorama bajo la luz de los elementos estudiados se pueden extraer varios puntos:

- Distanciamiento de la NSR-10 en la configuración de un volumen importante de las viviendas afectadas (edad de las edificaciones, configuración del sistema estructural, irregularidades en planta y en altura, irregularidades en la configuración del refuerzo)
- Afectaciones a infraestructura vital (colegios, universidades, hospitales, líneas vitales, estaciones de bomberos y policía) que han configurado, además del desastre natural decretado, una crisis humanitaria por la imposibilidad de suplir necesidades básicas como vivienda y alimentación
- Afectación de las redes eléctricas aéreas debido al colapso de elementos tanto estructurales como no estructurales y la posterior ruptura de cables
- Mayor afectación en la ciudad de Cali que en la de Medellín, aunque son equidistantes al epicentro por la configuración del terreno (suelos blandos en Cali contra suelos rocosos en el valle de Aburrá)
- Hay un volumen muy importante que ha aportado de manera espontánea la comunidad mediante la ayuda en labores de búsqueda y rescate, en la logística de suministros a las áreas afectadas y esto constituye un factor importante en la

capacidad de respuesta como factor no institucional y en la velocidad de recuperación.

- Las vías se han visto afectadas por los derrumbes y caída de escombros, de modo que los factores que evalúan la vía no son solo internos como evaluaciones de vulnerabilidad, sino que una evaluación de la amenaza debe considerar estos escenarios y sus probabilidades.
- La red vial no considera accesos aéreos que puedan verse afectados y resulten en puntos críticos de acceso por colapso de otras entradas al territorio estudiado.

Los daños resumidos en la Tabla 40 se concentran en los mismos componentes que evalúa la metodología: las viviendas y edificaciones, que corresponden a la robustez; los centros de salud, los centros educativos y los centros comunitarios, que en este trabajo hacen parte de los espacios y equipamientos de respuesta; los acueductos, las redes eléctricas y las vías, que corresponden a la redundancia; y la organización de la atención, que corresponde a la capacidad de gestión. Esta correspondencia indica que los criterios seleccionados representan los elementos que condicionaron la atención y la recuperación en los territorios afectados.

En conjunto, lo observado en Bogotá y en el occidente del país es coherente con el diagnóstico obtenido para la UPL Tunjuelito y respalda la aplicabilidad de la metodología como herramienta de diagnóstico. Esta comparación es cualitativa, el epicentro estuvo lejos de Bogotá y la demanda sísmica en la ciudad fue moderada, por lo que una validación cuantitativa requiere los registros de las estaciones acelerográficas de la UPL y un balance de daños desagregado por UPL, información que no estaba disponible al cierre de este documento.

7. CONCLUSIONES

La estimación de la capacidad de resiliencia ante eventos sísmicos si se analiza una unidad de territorio es compleja en función de diferentes escenarios y varios grupos de factores a considerar: en primer lugar y conforme a las definiciones presentadas en el estado del arte y marco teórico se tienen niveles de desempeño que se miden en función del tiempo alrededor del instante en que ocurre un evento disruptivo y para cada instante que desee estudiarse se tiene un balance diferente en las conexiones de los factores que se incluyen en el análisis: las 4 propiedades presentadas y cada uno de sus subcomponentes corresponden a estudios ya determinados en diferentes escenarios que han pretendido ser de carácter global, sin embargo elementos como el marco PEOPLES muestran la complejidad bajo la que se ha podido esquematizar el territorio: 7 dimensiones, 26 componentes, 49 factores y 35 sub-factores a considerar hacen de solo una metodología de esquematización un panorama complejo en donde cada uno de los factores y sub-factores exige la compilación y procesamiento de datos interinstitucionales. Esto explica en cierta medida el por qué el estado del arte presenta estudios parciales bajo la medición de factores del marco PEOPLES y permite, dentro de la incertidumbre, otorgarle un grado de cobertura “integral” a este trabajo en función de que evalúa la composición múltiple del territorio estudiado.

La información consultada se remite en su totalidad a bases de datos relacionadas con entidades distritales, de modo que las afectaciones en la calidad del diagnóstico dependen también de la vigencia de los datos. La periodicidad de actualización no corresponde con la intención de esta investigación de ofrecer un diagnóstico lo más actualizado posible, sin embargo, las fechas de últimas publicaciones corresponden a diferentes instantes. De esta manera es posible, con cierta incertidumbre, presentar un panorama de las condiciones de la UPL estudiada en función de un periodo y no de un instante, sin embargo, hay datos que no cuentan con respaldo institucional y que podrían servir como apoyo al levantamiento de datos útiles para la estimación de resiliencia.

La condición socioeconómica de la población está relacionada implícitamente con su rapidez de recuperación en función de que un escenario disruptivo no condiciona su

dependencia a la respuesta institucional, sino que pueden hacer uso de recursos propios ya sea en las primeras etapas de atención a necesidades básicas o a la restitución de condiciones de vivienda dignas en otros escenarios. Aunque la investigación no profundiza en esta relación si cabe resaltar este punto conforme a lo indicado por el DANE en el método de estratificación, si bien podría prestarse a interpretaciones de división social, la consideración del dato resulta en un insumo importante para los tomadores de decisiones de Gestión de activos porque el indicador socioeconómico guarda una estrecha relación con la vulnerabilidad comunitaria inclusive si las condiciones de sitio indicaran robustez por únicamente la ubicación geográfica.

La cobertura de datos no consideró datos de otras instituciones debido a que no se encontró información en las bases de datos distritales que permitieran la presentación y uso confiable de información geográfica que se requiere en una investigación de este tipo. Sin embargo, se presentaron 13 capas de información que recogen información valiosa y que sirve para definir una primera base de diagnóstico.

La estimación de la capacidad de resiliencia se da bajo la ponderación de 4 propiedades para esta investigación que son las ya mencionadas 4R, pero en la conclusión que se obtiene para cada una es posible identificar los factores a mejorar para que la capacidad general puedan verse afectadas para bien las medidas complementarias de resiliencia indicadas en el estado del arte: “Probabilidades de falla reducidas”, “consecuencias de falla reducidas” y “tiempo de recuperación reducido”

La incertidumbre de la metodología radica en la precisión no alcanzada durante el registro de datos que otorgaron las clasificaciones al territorio: Dentro de las medidas de robustez podrían considerarse otras variables adicionales como la edad de las edificaciones, la clasificación del sistema estructural y considerar comportamientos ante sismos de otros elementos relevantes como vías y líneas vitales. Para las medidas de redundancia, el análisis por teoría de grafos aplicado en este trabajo puede complementarse con el cálculo de rutas alternas entre nodos críticos y con la vulnerabilidad física de los elementos de cada red. La rapidez puede ser medida en compañía de una asociación de condiciones socioeconómicas más profunda y revisando el historial de ayudas gubernamentales ante

desastres para determinar el volumen de ayuda asignado por cada damnificado según la información de la que se tenga registro.

Con la información presentada y procesada fue posible identificar y organizar los factores e indicadores de resiliencia aplicables a la UPL Tunjuelito. Para el análisis se trabajó con cuatro criterios principales: redundancia, capacidad de gestión, respuesta y robustez. Cada uno permitió revisar una parte diferente del territorio; algunos resultados mostraron condiciones favorables, como la presencia de equipamientos, vías principales y servicios públicos, mientras que otros evidenciaron aspectos que pueden generar fragilidad, especialmente en la continuidad de redes esenciales, la articulación institucional y la capacidad de recuperación de la población con menores recursos.

El cumplimiento del objetivo específico Nº2 se presenta mediante las siguientes dos conclusiones:

- La microzonificación sísmica de Bogotá permitió incorporar las condiciones locales del suelo dentro del análisis. Con esta información se obtuvieron los espectros de aceleración de la UPL, los cuales sirvieron como referencia para revisar la demanda sísmica esperada en el territorio. Esto fue importante porque las condiciones del suelo pueden modificar la forma como se transmite el movimiento sísmico y, por tanto, también pueden influir en la respuesta de la infraestructura.

- Al comparar los espectros de aceleración con los registros acelerográficos revisados, se obtuvo una referencia del comportamiento sísmico de la zona frente a eventos registrados. Sin embargo, esta comparación no significa que el territorio esté libre de daño ante un sismo mayor, ya que la afectación final dependerá de cada edificación, su antigüedad, su sistema estructural, su estado de conservación y el cumplimiento de la normativa sismorresistente. Por esta razón, estos insumos se usaron como apoyo para el análisis de robustez física, pero no reemplazan una evaluación estructural detallada.

El cumplimiento del objetivo específico Nº3 se presenta mediante las siguientes dos conclusiones:

- La lógica difusa permitió trabajar con información que no siempre se puede medir de forma exacta. En este trabajo, criterios como la capacidad de gestión, la respuesta, la redundancia y la robustez combinan datos cuantitativos y cualitativos, por lo que no era suficiente calificarlos de forma rígida. El sistema difuso permitió asignar valores intermedios, relacionar las variables y obtener una lectura más ordenada de la resiliencia del territorio.

- La estructuración del sistema de valoración mediante lógica difusa permitió integrar variables de diferente naturaleza dentro de un mismo análisis. Esto fue útil porque no todos los criterios se expresan de la misma manera: algunos dependen de infraestructura, otros de gestión institucional, otros de servicios disponibles y otros de condiciones sísmicas. Así, la resiliencia se entendió como una condición gradual, que cambia según la combinación de los factores evaluados.

El cumplimiento del objetivo específico Nº1 se presenta mediante las siguientes cuatro conclusiones:

- En cuanto a la capacidad de gestión, la UPL presentó una condición media, con un valor de 0,529, resultado de cumplir tres de las cuatro condiciones verificadas en instrumentos de gestión del riesgo y en entidades de atención, y de una condición socioeconómica media-baja. Esto muestra que existen planes, entidades e instrumentos de gestión del riesgo que pueden orientar la atención de una emergencia; sin embargo, también se evidenció que la existencia de documentos no garantiza por sí sola una buena respuesta. Para que la gestión funcione de manera adecuada se requiere coordinación entre instituciones, información actualizada y aplicación real de los procedimientos establecidos.

- El factor de respuesta presentó la condición más favorable de los cuatro criterios, con un valor de 0,837, que es el máximo que puede entregar su sistema difuso, principalmente por la presencia de equipamientos de salud, estación de bomberos, colegios, parques, vías principales y servicios públicos. Estos elementos pueden apoyar la atención inicial después de un sismo, facilitar el ingreso de organismos de socorro y servir como puntos de apoyo temporal. Aun así, esta valoración

corresponde al estado previo del territorio, por lo que podría cambiar si el evento afecta las vías, las redes o los equipamientos necesarios para atender la emergencia.

- La redundancia de las redes analizadas en general tiene resultados medios con tendencia a ser bajos, el promedio de los valores encontrados es de 69.7 contra el valor más bajo en el estudio de referencia, que es de 53.8. Esto indica que la topología de las redes tiene falencias derivadas de la falta de conexiones redundantes que puedan configurar una topología más del tipo retícula en su superestructura. Las redes de alcantarillado mostraron una cantidad significativamente grande de subredes independientes dentro de la macro red lo que se traduce en estabilidad local en caso de falla de uno de los componentes (45 y 50 subredes en comparación con las 2 de la red de acueducto y las 6 de la malla vial).

- Robustez: El análisis de robustez tiene resultados medios con tendencia a ser altos (0,614, que corresponde a una vulnerabilidad de 0,386), derivados de la baja ocupación por vivienda y de las grandes áreas destinadas como dotacionales. Con la aceleración de 0,35 g adoptada para la edificación típica de dos pisos, la vulnerabilidad resultante es moderada; sin embargo, el análisis de sensibilidad mostró que el riesgo de localidad es el parámetro físico con mayor influencia en el índice, por lo que la definición de la demanda sísmica es determinante para la lectura de la robustez. El sector de menor robustez es la zona Piedemonte C, con 0,163, por la mayor amplificación espectral del suelo. En el suelo aluvial predominante, las velocidades de onda de 175 a 300 m/s corresponden a periodos fundamentales del depósito de 0,4 a 2,5 s, muy superiores al periodo de 0,2 s de la edificación típica de dos pisos, por lo que el efecto sobre las edificaciones de baja altura es de amplificación espectral.

Con la integración de los criterios evaluados, la UPL Tunjuelito obtuvo un índice de capacidad de resiliencia de 0,539 y se clasificó como medianamente resiliente ante eventos sísmicos. Este resultado responde al objetivo general del trabajo, ya que permitió obtener una estimación diagnóstica de la capacidad de resiliencia del territorio. La clasificación

muestra que la UPL cuenta con condiciones que pueden apoyar la atención inicial, especialmente por la presencia de vías, equipamientos, espacios de apoyo y servicios públicos; sin embargo, también presenta aspectos que pueden limitar su recuperación después de un sismo.

El criterio con mejor comportamiento fue la respuesta, mientras que la capacidad de gestión, la redundancia y la robustez se mantuvieron en niveles medios. Esto indica que existen condiciones que favorecen la resiliencia, pero también que es necesario fortalecer la articulación institucional, actualizar los instrumentos de gestión del riesgo a escala de UPL, revisar la infraestructura crítica y contar con información más detallada sobre el estado de las edificaciones.

Ahora bien, para evitar la linealidad del conjunto de reglas aplicadas en la capacidad de resiliencia, se realizó el análisis de las 81 combinaciones a partir de las variables de entrada de cada uno de los componentes de la resiliencia; en ese sentido, 11 combinaciones son resilientes, 5 son medianamente resilientes y 65 son poco resilientes, lo que en términos porcentuales equivale a 14 %, 6 % y 80 %, respectivamente. Esto indica que la base de reglas asigna la condición resiliente a una proporción menor de combinaciones, lo que refleja el peso de las condiciones críticas dentro del sistema.

Dicho análisis se aplicó para cada criterio encontrando que, para la robustez, que cuenta con un total de 144 combinaciones el 11 % de las combinaciones da como resultado una robustez alta, el 21 % una robustez baja y el 68 % una robustez media; ratificando la consideración de las limitaciones del sistema para cada uno de los componentes de la resiliencia.

Ahora, en relación con la capacidad de gestión y de respuesta el sistema que presenta 27 combinaciones asigna la condición con respuesta al 22 % de las combinaciones, respuesta regular al 37 % y no tiene respuesta al 41 %, evidenciando que no son proporcionales ni equiparables.

El resultado obtenido debe entenderse como una aproximación diagnóstica y no como una medición exacta del comportamiento de la UPL ante un sismo. En ese sentido, Tunjuelito tiene una base favorable para responder, pero requiere acciones previas que ayuden a

mejorar su recuperación y a reducir posibles afectaciones sobre la población, la infraestructura y el funcionamiento general del territorio.

El análisis de sensibilidad confirmó la estabilidad de esta clasificación, teniendo en cuenta que al variar todas las entradas del modelo entre −15 % y +15 %, el índice se mantuvo entre 0,510 y 0,612 y la UPL conservó la condición de medianamente resiliente en todos los casos simulados. Las variables que más influyen en el resultado son la redundancia de las redes y la demanda sísmica usada en la robustez; por ello, las acciones con mayor efecto sobre la resiliencia de Tunjuelito son las que aumentan la conectividad de las redes, en especial las de alcantarillado, y las que reducen la vulnerabilidad física de las edificaciones frente a la demanda sísmica esperada.

El sismo del 10 de agosto de 2026 permitió contrastar el diagnóstico de forma cualitativa. En Bogotá la demanda fue moderada y los efectos reportados se limitaron a fisuras y daños en elementos no estructurales, sin afectaciones estructurales moderadas ni severas en las unidades verificadas, lo que es coherente con la robustez media-alta obtenida. La activación del sistema distrital la misma mañana, la verificación de miles de unidades habitacionales durante el primer día y la ausencia de afectaciones estructurales en la red hospitalaria coinciden con el criterio mejor valorado, la respuesta. A su vez, la información del evento se reportó por localidad y no por UPL, lo que confirma la falta de coordinación a esa escala identificada en la capacidad de gestión. En las zonas más afectadas del país, los daños se concentraron en viviendas, hospitales, colegios, acueductos, redes eléctricas y vías, que son los componentes evaluados por los cuatro criterios de la metodología, lo cual respalda la pertinencia de los criterios y la aplicabilidad de la metodología como herramienta de diagnóstico, aunque una validación cuantitativa requiere un evento con una demanda cercana a la de diseño en Bogotá y un balance de daños desagregado por UPL.

Finalmente, el trabajo presenta una metodología que sirve como punto de partida para evaluar la resiliencia ante eventos sísmicos tanto en esta como en otras UPL de Bogotá e inclusive otros territorios siempre y cuando se realice el proceso de adaptación correspondiente a las circunstancias propias de cada territorio. El aporte principal está en la integración de información territorial mediante bases de datos de información geográfica, información sísmica e institucional mediante operadores de lógica difusa, esto cual permite

obtener una lectura general del territorio y un diagnóstico que en términos sencillos entregue un análisis multifactorial y multitemporal con el respaldo del volumen de información que es insumo para el desarrollo de la metodología.

8. RECOMENDACIONES

Una ampliación del estudio de robustez puede desarrollarse mediante la tipificación de las estructuras en una unidad de territorio clasificando: número de pisos y sistemas estructurales, de modo que se puedan realizar modelos de elementos finitos que permitan estimar el comportamiento frente a un sismo de diseño y extrapolar los resultados a las áreas según el tipo de edificación más parecido a las tipificadas.

Las investigaciones derivadas hacia la robustez pueden contemplar la edad de las edificaciones como un factor de ajuste o directamente una variable de estudio dentro de la robustez y derivar en recomendaciones para el refuerzo estructural o medidas que mejoren esta propiedad de análisis, debido a que los informes preliminares del sismo de San José del Palmar han indicado daños muy importantes en edificaciones de patrimonio cultural, que si bien por una observación de la altura no mostraban vulnerabilidad, han sucumbido ante los efectos sísmicos con colapsos totales o de un porcentaje importante dentro del área total de la edificación, también los hospitales municipales cuya edad supera la de la normativa vigente sufrieron daños importantes que afectaron en una medida importante el funcionamiento de hospitales, que, según la normativa vigente representan el grupo de uso de mayor importancia.

Se pueden desarrollar estudios que profundicen en el papel del colapso de los elementos no estructurales dentro del análisis de robustez. La evidencia fotográfica del sismo de san José del palmar ha mostrado población civil gravemente afectada por caída de elementos, así como bloqueos viales y otros daños.

La evaluación de servicios públicos y de redes viales puede desarrollarse desde perspectivas más allá que la topología o existencia de la red, sino de la interrelación y su

vulnerabilidad derivada de la dependencia de otras redes y de otros elementos urbanos, porque en casos como en el sismo de San José del Palmar se evidenció una falla generalizada del servicio eléctrico por la ruptura de cables ocasionada por la caída de elementos de fachada o del colapso de edificaciones sobre los cableados que conforman las redes locales y vías. Si bien la literatura indica que los elementos de la red eléctrica no son vulnerables por sí mismos, su configuración de redes aéreas y su cercanía a las fachadas configura un nivel de vulnerabilidad para la red que no se encontró registrado en la bibliografía de resiliencia de redes eléctricas. De este análisis se deriva la dependencia de redes de suministro de agua y de redes de comunicación por su funcionamiento bajo suministro eléctrico. También se puede profundizar en el análisis de redes vitales para diagnosticar puntos débiles con base en el comportamiento de los materiales de la red dentro de un suelo con base en su respuesta al evento sísmico

Se pueden desarrollar estudios de redundancia de la red vial con base en cálculo de rutas alternas entre puntos vitales mediante el uso de algoritmos como los usados en navegación convencional para determinar niveles en función de la cantidad de rutas que conectan dos puntos y de la clasificación de esas vías (avenidas, calles de doble sentido, calles de un solo sentido y dos carriles, un solo carril, etc.), también se puede evaluar la interconectividad con otros puntos que configuren accesos a los territorios en donde la unidad de análisis dependa de esas conexiones, como en el caso de municipios.

En cuanto a la movilidad, se recomienda definir y mantener despejadas rutas de emergencia que permitan el ingreso de organismos de socorro y la evacuación de la población, especialmente en los sectores con mayor concentración de viviendas y equipamientos.

Se pueden hacer diagnósticos de capacidad de respuesta en función de indicadores que relacionen la infraestructura con la capacidad de servicios que poseen (cantidad de baños en función de una cantidad de habitantes o m2 de área cubierta disponible en función de una densidad poblacional, incluyendo colegios, polideportivos o infraestructura privada que pueda servir como albergue). Debido a que esta investigación presenta las áreas de parques, pero estos podrían no configurar albergues o centros de acopio por no disponer de medidas salubres o de seguridad necesarias.

Se pueden desarrollar estudios que profundicen en metodologías que desarrollen protocolos de incorporación de población civil a los procesos de atención de desastres, porque se ha visto en los eventos sísmicos de los últimos meses tanto en Venezuela como en Colombia, una masiva movilización de la población para prestar su ayuda en la remoción de escombros y búsqueda de personas, sin embargo el riesgo asociado a la actividad en conjunto con el desconocimiento procedimental de las actividades de búsqueda y rescate, configura un riesgo importante para que la población civil sufra daños en medio de la ayuda que pueda prestar en estas situaciones.

También es importante fortalecer la preparación de la población mediante simulacros, jornadas de información y socialización de rutas de evacuación, ya que la respuesta inicial también depende de que las personas sepan cómo actuar.

Se recomienda mejorar la coordinación entre entidades distritales, locales y comunitarias, de manera que los planes de emergencia no se queden solo en documentos, sino que puedan aplicarse de forma clara durante una situación real.

Finalmente, las acciones de planificación urbana en la UPL deberían tener en cuenta la resiliencia ante eventos sísmicos, priorizando intervenciones en infraestructura crítica, servicios esenciales y zonas con mayor vulnerabilidad.

9. LIMITACIONES

Este trabajo tiene un alcance diagnóstico, por lo que no busca predecir exactamente qué daños produciría un sismo en la UPL Tunjuelito, sino revisar, con la información disponible, qué condiciones del territorio pueden ayudar o dificultar su respuesta y recuperación.

Una de las principales limitaciones fue la información disponible, ya que los datos usados vienen de distintas entidades y no todos tienen la misma fecha de actualización ni el mismo nivel de detalle. La geometría de las redes de acueducto y alcantarillado corresponde al año 2017 y las coberturas a 2025, según el Observatorio Ambiental de Bogotá y el portal de Cobertura Residencial y Legal del Servicio de Acueducto; para revisar si esto podía cambiar de forma importante el resultado, el análisis de sensibilidad del numeral 5.5.1, con variaciones de ±10 % y ±15 % en todas las entradas, mostró que el índice se mantiene entre 0,510 y 0,612 y que la UPL conserva la clasificación de medianamente resiliente.

La redundancia de las redes se evaluó a partir de su topología, con los índices de grafos y la ecuación descritos en el numeral 4.2.1. Los valores de comparación provienen de las redes tipo del estudio de referencia (Zhang, Miller-Hooks, & Denny, 2015), de modo que su aplicación en otras zonas requiere información geográfica de las redes con un nivel de detalle equivalente al usado en este trabajo.

Otra limitación es que el sistema difuso permite relacionar las variables y obtener una valoración conjunta, pero no simula directamente lo que pasa entre las redes cuando una de ellas falla, por ejemplo, no calcula de manera específica cómo una falla de energía afectaría el funcionamiento del acueducto, por eso el resultado debe entenderse como una aproximación al estado general del territorio y no como una simulación detallada de sus sistemas.

Para la robustez se usaron la microzonificación sísmica, los registros acelerográficos disponibles, el número de pisos y el uso del suelo, pero no se hizo una revisión estructural edificio por edificio ni se analizaron materiales, diseños o daños existentes. Los registros acelerográficos también dependen de los eventos registrados y de la ubicación de las

estaciones, por lo que sirven como referencia, pero no representan todos los escenarios sísmicos posibles.

En redundancia, respuesta y capacidad de gestión se revisaron vías, redes de servicios públicos, colegios, centros de salud, organismos de atención y herramientas de gestión del riesgo, aunque no se verificó en campo el estado real de todos estos elementos ni la disponibilidad de personal y recursos durante una emergencia, por eso los resultados muestran condiciones que pueden favorecer o limitar la resiliencia, pero no permiten asegurar cómo sería la respuesta real de la UPL durante un sismo.

Finalmente, los resultados corresponden a la UPL Tunjuelito y a las variables usadas en este estudio, por lo que la metodología puede aplicarse en otras zonas de Bogotá, pero sería necesario ajustar los datos, los criterios y las condiciones de evaluación. Por esta razón, el resultado no debe verse como un valor definitivo de resiliencia, sino como una herramienta de diagnóstico que puede apoyar la gestión del riesgo y la identificación de aspectos que requieren mayor atención.

10. COMENTARIOS FINALES

El desastre acontecido en San José del Palmar durante la mañana del 10 de agosto del 2026 y que ha causado graves afectaciones en el eje cafetero y el valle del Cauca, ha dejado 273 muertos y más de 3800 heridos. Más de 93000 personas afectadas que en menos de dos minutos vieron transformada su cotidianidad de manera trágica con la pérdida de vidas o de viviendas y las condiciones de recuperación no son claras porque la magnitud de la tragedia ha creado crisis a nivel de infraestructura y humanitaria que requieren los máximos esfuerzos desde todas las fuentes de apoyo para preservar las vidas que sean posibles durante esta fase inicial de atención a la emergencia.

Michael Hopf escribió “Los tiempos difíciles crean hombres fuertes”, pero la observación de esta tragedia ha mostrado las múltiples caras de los héroes que habitan las calles cuando ayudan con manos desnudas a retirar escombros, a cargar insumos, a preparar alimentos para damnificados o rescatistas y han dispuesto lo poco o mucho que tienen para el servicio de la comunidad.

Desde la ingeniería civil es importante reconocer nuestro papel como agentes de desarrollo para las comunidades, cuya misión es utilizar el conocimiento técnico y normativo para ofrecer soluciones eficientes y seguras para las necesidades de infraestructura de las comunidades, velando por encima de todo, por la protección de las vidas que resultan ser frágiles ante eventos sísmicos que tienen capacidad de destrucción como la vista en este escenario.

Que todas las acciones que llevemos a cabo dentro del ejercicio de nuestra profesión tengan esta motivación y reflexión constantes, recordando momentos como estos en donde el dolor de la pérdida es algo que no deseamos para ninguno de nuestros allegados, conocidos, vecinos, compatriotas y conciudadanos del planeta.

11. REFERENCIAS

FLOREZ, C., & LOZANO, C. (2007). ANALISIS Y TRATAMIENTO DE SEÑALES DE FUENTES SISMOGENICAS DE CAMPO CERCANO A SAN JOSE DE CUCUTA. *Conferencia internacional en ingenieria sismica.* Lima: Universidad nacional de ingenieria.

VERA, B. (2003). *EVALUACION DE ERRORES DE DATOS SISMOLOGICOS Y SUS EFECTOS SOBRE LOS PARAMETROS Y MODELOS DERIVADOS DE ESTOS PARA UNA REGION DETERMINADA CUBIERTA POR LA RED DEL OBSERVATORIO SISMOLOGICO DEL SUROCCIDENTE - OSSO.* Santiago de Cali: Universidad del Valle.

Universidad INHA. (27 de septiembre de 2011). *Universidad INHA.* Obtenido de PRISM : https://sem.inha.ac.kr/prism_2021/index.htm

ERAZO, B., & VARGAS, P. (2020). *DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA PROCESAMIENTO Y CORRECCIÓN DE REGISTROS, Y GENERACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA SÍSMICA.* Quito: Universidad Politecnia Salesiana.

GUZMAN, D., & CASTAÑO, V. (2006). La logica difusa en ingenieria: principios, aplicaciones y futuro. *Ciencia y tecnologia*, 87-107.

Iñiguez Siguenza, L. M. (2017). *Análisis de la resiliencia ante la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en la ciudad de Machala.* Ecuador: Universidad técnica de Machala.

KAMMOUH, O., & NOORI, A. Z. (2019). Resilience Assessment of Urban Communities. DOI: 10.1061/AJRUA6.0001004.

LU, X., & LIAO, W. (2020). Quantification of disaster resilience in civil engineering: A review. Journal of Safety Science and Resilience.

SERRANO, A., & AMOROCHO, M. T. (2005). A las puertas del siglo XXI: Logica difusa - una tecnologia que esta revolucionando el mundo. *Ingenieria y universidad*, 30.

BOGOTÁ, A. M. (2021). DECRETO 555 DE 2021. *Por el cual se adopta la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.* Bogotá D.C.

MOYA, F., BARBAT, A., & CANAS, J. (1996). *Evaluación probabilista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras de hormigón armado por medio de simulación.* Barcelona, España: MONOGRAFIAS DE INGENIERIA SISMICA.

ABANTA, S., & CARDENAS, D. (2015). *Determinación de la vulnerabilidad sísmica aplicando el método de Benedetti – Petrini en las Instituciones Educativas del Centro Histórico de Trujillo, Provincia de Trujillo, Región La Libertad.* Trujillo: Universidad Pivada Antenos Orrega.

VESSIA, G., LAURENZANO, G., & PAGLIAROLI, A. (2021). Seismic site response estimation for microzonation studies promoting the resilience of urban centers. *Engineering geology*.

Acueducto, E. d. (s.f.). *Acueducto*. Obtenido de https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-distribucion/red-matriz

DELGADO, Y. (2023). Estimación de la capacidad de resiliencia de sistemas de excavaciones para sótanos en sectores urbanos. Estudio de caso: Falla edificio Green Office en la Avenida Carrera 11 N° 98-07 – Bogotá D.C. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Benitez, C., & Gómez, A. (2021). ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA PARA UN GRUPO DE ESTRUCTURAS DEL ENTORNO URBANO QUE PUEDEN VERSE AFECTADAS POR EL USO DE TECNOLOGÍA TRENCHLESS EN UN SECTOR DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ D.C. *ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA PARA UN GRUPO DE ESTRUCTURAS DEL ENTORNO URBANO QUE PUEDEN VERSE AFECTADAS POR EL USO DE TECNOLOGÍA*

TRENCHLESS EN UN SECTOR DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ D.C. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Pedreros, N., & Roncancio, V. (2022). *ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA DE UN SISTEMA DE EXCAVACIÓN PARA SÓTANOS EN BOGOTÁ D.C., ESTUDIO DE CASO: TORRE ADMINISTRATIVA SENA.* Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas .

Holling, C. S. (1973). *Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics.*

Bruneau, M., & Chang, S. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra : The Professional Journal of the Earthquake Engineering Research Institute*, 733-752.

BOGOTÁ, A. (14 de febrero de 2018). *Bogotá*. Obtenido de https://bogota.gov.co/mi-ciudad/planeacion/estratificacion-todo-lo-que-debe-saber

Zhang, X., Miller-Hooks, E., & Denny, K. (2015). Assessing the role of network topology in transportation network resilience. *Journal of Transport Geography, 46*, 35-45.

YEPEZ, BARBAT, A., & CANAS, J. (1995). *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería.* Barcelona: MONOGRAFIAS DE INGENIERIA SISMICA.

Vesga Rojas, H. (2017). Nuevas formas para optimizar la gestión del riesgo desde la perspectiva de territorios resilientes en Colombia. *Espacios, 2018*(8).

Salem, S., Siam, A., El.Dakhakhni, W., & Tait, M. (2020). Probabilistic Resilience-Guided Infrastructure. *ASCE. J. Manage.*

ROMERO, R., & BELLOVI, B. (2018). *Ingenieria de la resilencia: conceptos basicos del nuevo paradigma en seguridad.* Instituto nacional de seguridad y salud en el trabajo.

Renschler, C. (2015). *The PEOPLES Resilience Framework – An Integrated Quantitative Measure and Modeling of Sustainable Development and Disaster Risk Reduction.*

Pineda, J., & Larrañaga, S. (2022). *Simplified Assessment of the Resilience Capacity of Urban Areas affected by Microtunneling Activities.*

Pineda, J., Larrañaga-Rubio, S., & González-Pérez, M. (2025). Resilience index for earth retaining systems in road infrastructure. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*.

Pineda, J., Larrañaga, S., & Carmona, J. (2024). Multi-criteria Analysis for the Estimation of Resilience Indices in Geotechnical Systems: Application to Earth-Retaining Structures. *The International Journal of Architectonic Spatial and Environmental Design, 18*, 43-71.

Mallet, R. (1856). *On the Physical Conditions involved in the Construction of Artillery.* Longman, Brown, Green, Longmans, and Roberts.

Kammouh, O., & Cimellaro, G. (2024). RESILIENCE OPTIMIZATION IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS: LARGE-SCALE SIMULATION AND RECOVERY PLANNING. *World Conference on Earthquake Engineering proceedings.* Obtenido de https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105027867649

Hollnagel, E., Woods, D., & Leveson, N. (2006). *Resilience engineering: Concepts and precepts.* Ashgate Publishing, Ltd.

Hernández, M. (2002). *Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas.* Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Gomez, J. (2026). *Análisis de resiliencia comunitaria ante eventos de inundación en el barrio de patio bonito tierra buena de la localidad de Kennedy en la ciudad de Bogotá D.C. por medio de una evaluación multicriterio.* Obtenido de http://hdl.handle.net/11349/100694

De Iuliis, M., Khaghanpour-Shahrezaee, R., Cimellaro, G., & Khanmohammadi, M. (2024). Fuzzy-based approach to quantify the downtime of buildings in developing countries. *Resilient Cities and Structures, 3*(1), 1-19.

Cutter, S., Burton, C., & Emrich, C. (2010). Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management, 7*(1).

Contreras, Y., & Amaya, M. (2020). Cálculo y análisis de la resiliencia de los departamentos de Colombia. *Sociedad y economía*.

Cimellaro, G., Cardoni, A., & Reinhorn, A. (2024). Modelling infrastructure interdependencies and cascading effects using temporal networks. *Resilient Cities and Structures, 3*(3), 28-42.

Churón, T. (2023). *Venecia un barrio para la gente diseño de renovacion urbana del espacio publico en el barrio Venecia-Bogotá D.C.* Bogotá D.C., Colombia: Universidad la Gran Colombia.

Carpenter, S. (2001). From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems*, 765-781.

Cardoni, A., Tarantini, R., Calidori, A., & Cimellaro, G. (2024). SEISMIC VULNERABILITY AND RESILIENCE OF LARGE-SCALE TELECOMMUNICATION NETWORKS. *World Conference on Earthquake Engineering proceedings.* Obtenido de https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105027871630

Cardoni, A., Elahi, A., & Cimellaro, G. (2025). Seismic risk assessment of natural gas networks at the urban scale. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 126*.

Cardona, O., Ordaz, M., Marulanda, M., & Barbat, A. (2008). Estimation of Probabilistic Seismic Losses and the Public Economic Resilience—An Approach for a Macroeconomic Impact Evaluation. *Journal of Earthquake Engineering, 12*, 60-70.

Bristow, D., & Hay, A. (2017). Graph Model for Probabilistic Resilience and Recovery Planning of Multi-Infrastructure Systems. *Journal of Infrastructure Systems, 23*(3), 04016039.

Beltran, I., Garcia-Sanchez, D., Cimellaro, G., & Cardoni, A. (2025). Methodology to Assess the Level of Service and Resilience of Rural Roads in Italian Seismic Zones: Challenges and Strategies for Improvement. *Lecture Notes in Civil Engineering, 770*, págs. 75-88.

Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE). (2010). *INFORME FINAL ZONIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE BOGOTÁ PARA EL DISEÑO.* Bogotá.

Cimellaro, G., Villa, O., & Bruneau, M. (2015). Resilience-Based Design of Natural Gas Distribution Networks. *Journal of Infrastructure Systems, 21*(1).

Yáñez contreras, M., Amaya Martelo, J., & Rodríguez Páez, H. (2020). *Cálculo y análisis de la resiliencia de los departamentos de Colombia.*

Carrizosa, M., Gutman, M., & Cohen, M. (2018). *Enfrentar el riesgo: nuevas prácticas de resiliencia urbana en américa Latina.*

MASLOW, A. (1943). A theory of human motivation. *Psychological review*, 370-396.

García Bátiz, M. L., Venegas Sahagún , B. A., & Payan, L. (2016). *Analysis of Sustainable Development in Local Spaces: The Application of the Theory of Fuzzy Sets.*

De Iuliis, M., Kammouh, O., & Cimerallo, G. P. (2022). *Measuring and improving community resilience: A fuzzy logic approach.*

Chaves, J. P., Cardoni, A., Cimerallo, G. P., Delso Murcia, J., & López Almanza, F. (2026). *Clustering–Based Seismic Resilience Assessment of Large-Scale Building Portfolios.*

Mena Hernandez, U. (2002). *Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas.* Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

IDIGER. (2026). *IDIGER*. Obtenido de IDIGER: https://www.idiger.gov.co/escenarios-de-riesgo/sismico/gestion

Cardona, O. D. (2009). La gestión del riesgo sísmico de desastres. Un enfoque basado en la integralidad.

COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO. (2010). REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE (NSR-10). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE (NSR-10)*. Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Allendy, B., & Fink, J. (2005). Toward Inherently Secure and Resilient Societies.

Rincón Aguirre, A. J., & Bonilla Parra, M. A. (2021). Estimación del índice de resiliencia en tres estructuras de contención en la vía Sibaté - Fusagasugá.

Dominguez, N., & Ibrahimbegovic, A. (2013). Propuesta de un programa de mejoramiento de resiliencia para una ciudad tipo en la Península de Yucatán.

Arroyo, O., Arteta, C., Blandon, C., Bonett, R., Carrillo, J., Ortiz, A., . . . Colombian EarthQuake Engineering Research Network. (2026). Reporte Preliminar Sismo Mw 7.4, San José del Palmar, Colombia 10-.

Congreso de la república de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012, Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

Congreso de la república. (2025). Ley 2474 de 2025, Mediante la cual se modifica la Ley 1523 de 2012, reconociendo e incluyendo a los animales dentro de la política de gestión de riesgos de desastre y se dictan otras disposiciones.

Presidencia de la república. (2017). Decreto 2157 de 2017, Por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la Ley 1523 de 2012.

Concejo de Bogotá D.C. (2024). Acuerdo 927 de 2024, Por medio del cual se adopta el Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas del Distrito Capital 2024-2027 “Bogotá Camina Segura”.

Naciones unidas. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and control, 8*, 338-353.

Feltan, C., & Caballero, A. L. (2016). Principios de lógica difusa.

Reggiani, A., Bucci, P., & Russo, G. (2010). Accessibility and Impedance Forms: Empirical Applications to the German Commuting Network. *International Regional Science Review*, 230-252.

Kansky, K. J., & Beauguitte, L. (1963). Structure of Transportation Networks.

Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Seismic resilience of a hospital system. *Structure and Infrastructure Engineering, 6*(1-2), 127-144. doi:10.1080/15732470802663847

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2026). *Bogotá mantiene activo sistema de emergencias tras terremoto del 10 de agosto*. Obtenido de Bogota.gov.co: https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/bogota-mantiene-activo-sistema-emergencias-tras-terremoto-10-de-agosto

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2026). *Colegios oficiales de Bogotá son revisados tras el sismo de este lunes 10 de agosto: no se han encontrado afectaciones graves*. Obtenido de Bogota.gov.co: https://bogota.gov.co/mi-ciudad/emergencias/bogota-verifica-infraestructura-de-colegios-publicos-tras-terremoto

IDIGER. (2026). *Noticias 2026*. Obtenido de IDIGER: https://www.idiger.gov.co/prensa/noticias/2026

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., . . . Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer.* Chichester: John Wiley & Sons.