

Localización de centros médicos temporales para escenarios de eventos sísmicos en la ciudad de Bucaramanga a partir de un modelo multi-fase basado en clusterización y algoritmos de solución.

Ana María López Saltarin y Juan Sebastián Ayala Galvis

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Industrial

Director

Juan Camilo López Vargas

Doctor en Ingeniería

Codirectora

Verónica Duque Uribe

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mis padres por su apoyo incondicional en cada paso de mi camino, son mi más grande motivación, gracias por su amor, comprensión y guía.

A mi familia por darme el impulso para seguir mis sueños, por sus palabras de aliento y consejos.

A ti Sebas por ser parte fundamental de este proceso, por estar siempre presente, sin tu apoyo nada de esto sería posible.

A todas las personas que me acompañaron y creyeron en mí.

Ana María López Saltarin

A Dios, mi guía en este camino, por la sabiduría y la fortaleza que me ha brindado en cada etapa.

A mis padres y a mi hermana, por su amor, sus consejos y su apoyo incondicional; por acompañarme siempre y motivarme a cumplir mis sueños.

A mi familia, por ser parte de este proceso y formar parte de este logro.

Y a ti, Ana, por tu compañía incondicional, tu comprensión, los momentos vividos y los aprendizajes compartidos. Me llena de felicidad cerrar esta etapa junto a ti y compartir este proyecto.

Juan Sebastián Ayala Galvis

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a Dios, por brindarnos la sabiduría, la fortaleza y ser la luz
en nuestro camino.

A la Universidad Industrial de Santander, por ser un espacio de formación integral, donde
no solo nos forjamos como profesionales, sino también como personas, brindándonos las mejores
experiencias.

A nuestro director, el profesor Juan Camilo, por su acompañamiento, orientación y
disposición durante el desarrollo de este proyecto.

A nuestra codirectora, la profesora Verónica, por compartir sus conocimientos,
experiencias y ser guía fundamental en este camino.

A todos los docentes que tuvimos la fortuna de encontrar a lo largo de nuestra carrera,
quienes fueron transmisores de conocimiento e hicieron parte fundamental de nuestra
formación como profesionales íntegros.

A nuestras familias que fueron apoyo incondicional en cada paso.

A nuestros amigos y compañeros, quienes hicieron de esta experiencia una memoria
inolvidable y que, entre risas, sueños y esfuerzo compartido, fueron un apoyo esencial para
culminar nuestros estudios

Ana María López y Juan Sebastián Ayala

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Generalidades del proyecto.....	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo general.....	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Resultados esperados	20
1.4 Metodología	21
1.4.1 Revisión y caracterización del problema desde la literatura especializada	21
1.4.2 Análisis de herramientas de modelación.....	22
1.4.3 Diseño del modelo multi-fase de localización	22
1.4.4 Validación del modelo propuesto	23
1.4.5 Evaluación de esquemas de localización a través del modelo	24
1.4.6 Presentación de los resultados	24
2. Revisión de la literatura	25
2.1 Análisis bibliométrico.....	25
2.1.1 Publicaciones por país.....	26
2.1.2 Evolución de publicaciones por año	27
2.1.3 Análisis de las palabras clave	28
2.1.4 Selección de artículos	30
2.2 Análisis de la literatura	31

2.2.1	Logística humanitaria y las fases del desastre	31
2.2.2	Tipos de instalaciones abordadas.....	33
2.2.3	Enfoques Metodológicos	34
2.2.4	Resultados relevantes.....	38
2.2.5	Tendencias y vacíos de investigación.....	39
2.3	Marco de antecedentes.....	40
2.4	Marco teórico	42
2.4.1	Desastres	43
2.4.1.1	Tipos de desastres.	43
2.4.2	Vulnerabilidad urbana ante sismos	44
2.4.3	Logística humanitaria.....	45
2.4.3.1	Fases en la logística humanitaria.	45
2.4.4	Problema de localización	47
2.4.4.1	Clasificación de los problemas de localización.	47
2.4.4.2	Enfoques clásicos de localización: distancia y cobertura.	48
2.4.5	Cobertura en problemas de localización	49
2.4.6	Localización en la logística humanitaria.....	50
2.4.7	Clusterización	51
2.4.7.1	Clasificación de métodos de análisis de clústeres.....	52
2.4.7.2	Determinación del número de clústeres.....	53
3.	Selección de las herramientas de modelación.....	54
3.1	Planteamiento general para la selección	54
3.2	Herramientas de clusterización y enfoques de solución para la localización	55

3.2.1	Clusterización	56
3.2.2	Localización	58
3.3	Herramientas computacionales de soporte.....	61
4.	Desarrollo del modelo multi-fase.....	62
4.1	Definición general del modelo.....	62
4.2	Fase de clusterización	64
4.2.1	Variables de entrada seleccionadas.....	64
4.2.2	Selección del número de clústeres	67
4.2.3	Clusterización de la ciudad	70
4.3	Fase de localización	73
4.3.1	Estimación de la demanda potencial.....	74
4.3.2	Localización de los centros médicos temporales	76
4.4	Evaluación de la cobertura.....	77
4.4.1	Definición del radio de cobertura	78
4.4.2	Criterio de cobertura Barrio-CMT	80
4.4.3	Medición de la cobertura	80
5.	Validación y evaluación de esquemas de localización	81
5.1	Validación del modelo desarrollado	81
5.1.1	Validación de la coherencia en la fase de clusterización	82
5.1.2	Validación de la localización de los centros médicos temporales	83
5.1.3	Validación del modelo para representar y evaluar cobertura.....	85
5.2	Evaluación de esquemas de localización	87
5.2.1	Definición de los esquemas de localización	87

5.2.2	Caracterización territorial de los esquemas	89
5.2.3	Configuración espacial los centros médicos temporales (CMT)	94
5.2.4	Desempeño en términos de cobertura	96
6.	Discusión.....	100
6.1	Interpretación de resultados	100
6.2	Implicaciones para la implementación.....	101
6.3	Nivel de segmentación	102
6.4	Alcance y aportes	103
7.	Conclusiones	104
8.	Recomendaciones	105
	Referencias Bibliográficas	107

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Cumplimiento de objetivos</i>	15
Tabla 2 <i>Resultados esperados de acuerdo con los objetivos</i>	20
Tabla 3 <i>Estructuración de ecuación de búsqueda</i>	26
Tabla 4 <i>Consolidación sobre los enfoques metodológicos de la literatura revisada.</i>	35
Tabla 5 <i>Fases de la gestión de desastre</i>	46
Tabla 6 <i>Tipos de distancias</i>	48
Tabla 7 <i>Comparación de métodos de clusterización.</i>	56
Tabla 8 <i>Comparación de los algoritmos k-medias y k-medoides.</i>	57
Tabla 9 <i>Análisis de los modelos basados en la distancia para localizar p instalaciones.</i>	59
Tabla 10 <i>Análisis de los modelos de cobertura.</i>	60
Tabla 11 <i>Resumen de las variables de entrada</i>	64
Tabla 12 <i>Muestra de 10 barrios caracterizados con las variables seleccionadas.</i>	66
Tabla 13 <i>Resumen del perfil de clúster para k=7</i>	82
Tabla 14 <i>Salida final del modelo en la fase de localización para k-clúster=7</i>	84
Tabla 15 <i>Estimación del radio de cobertura para k-clúster=2.</i>	86
Tabla 16 <i>Evaluación de cobertura en el modelo para los barrios del caso frontera.</i>	87
Tabla 17 <i>Resumen del perfil clústeres esquema 1.</i>	92
Tabla 18 <i>Resumen del perfil clústeres esquema 2.</i>	93
Tabla 19 <i>Resumen del perfil clústeres esquema 3.</i>	93
Tabla 20 <i>Coordenadas de los CMT localizados en cada esquema propuesto</i>	95
Tabla 21 <i>Evaluación de cobertura para los esquemas de localización.</i>	97

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Métrica de documentos publicados por país</i>	27
Figura 2 <i>Métrica de documentos publicados por año</i>	28
Figura 3 <i>Mapeo en VOSviewer de la red de palabras claves</i>	29
Figura 4 <i>Selección de estudios mediante bases de datos y registros</i>	31
Figura 5 <i>Tipos de desastre</i>	44
Figura 6 <i>Flujo general del modelo</i>	63
Figura 7 <i>Descripción general del algoritmo PAM</i>	72
Figura 8 <i>Coherencia espacial del modelo para k-clúster=7</i>	83
Figura 9 <i>Esquema de localización para la ciudad de Bucaramanga para k-clúster=7</i>	84
Figura 10 <i>Caso frontera para la evaluación de cobertura en clúster 1.</i>	86
Figura 11 <i>Elbow (WSS)- PAM sobre matriz fusionada.</i>	88
Figura 12 <i>Silhouette- PAM sobre matriz fusionada</i>	88
Figura 13 <i>Perfil normalizado clúster $k=2$, $k=3$, $k=5$.</i>	90
Figura 14 <i>Distribución espacial de clústeres con $k=2$, $k=3$ y $k=5$</i>	91
Figura 15 <i>Configuración espacial del sistema de atención para cada esquema</i>	94
Figura 16 <i>Evaluación de la cobertura de los esquemas de localización de CMT ante sismos en la ciudad de Bucaramanga.</i>	97
Figura 17 <i>Resumen comparativo de la evaluación de cobertura entre los esquemas de localización.</i>	99

Lista de Apéndices

Apéndice A. Barrios de la ciudad de Bucaramanga y sus centroides.

Apéndice B. Procesamiento de la información de estrato socioeconómico e IPM.

Apéndice C. Asignación del porcentaje de daño esperado.

Apéndice D. Estimación de la demanda desagregada por barrios.

Apéndice E. Consolidado barrios caracterizados con las variables seleccionadas.

Apéndice F. Información considerada para la definición (W_{min} , W_{max}).

Apéndice G. Modelo multifase.

Apéndice H. Artículo

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Resumen

Título: Localización de centros médicos temporales para escenarios de eventos sísmicos en la ciudad de Bucaramanga a partir de un modelo multi-fase basado en clusterización y algoritmos de solución *

Autor: Ana María López Saltarin, Juan Sebastián Ayala Galvis**

Palabras Clave: Logística, clusterización, localización, centros médicos temporales (CMT).

Descripción: La respuesta médica posterior a un desastre ocasionado por un sismo requiere decisiones de localización que definan, con anticipación, puntos de atención temporales capaces de atender una demanda potencial elevada bajo restricciones de accesibilidad asociadas a afectaciones en infraestructura y movilidad. En este estudio, la localización de estos puntos para la ciudad de Bucaramanga se aborda mediante la caracterización de los barrios a partir de información socioeconómica y de daño en edificaciones, con el fin de aproximar condiciones relativas de vulnerabilidad y afectación esperada. Este proyecto desarrolla y evalúa un modelo multi-fase para proponer esquemas comparables de localización de Centros Médicos Temporales (CMT) y cuantificar su desempeño mediante cobertura. La metodología integra tres etapas: (i) segmentación territorial de 206 barrios mediante clusterización k-medoids (PAM), donde k representa el número de clústeres definidos para la ciudad; (ii) estimación de demanda potencial asociada al número esperado de víctimas y determinación, para cada clúster, de una ubicación representativa mediante centroide ponderado y (iii) evaluación del desempeño mediante un indicador de cobertura, donde un barrio se considera atendido si su centroide se ubica dentro del radio de servicio del CMT de su respectivo clúster. Se comparan escenarios $k=2$, $k=3$ y $k=5$; entre los evaluados, $k=5$ presenta el mejor desempeño agregado de cobertura (88,05%) y una distribución espacial más equilibrada de la atención. Así, el modelo aporta un procedimiento reproducible que integra segmentación socioespacial, estimación de demanda y evaluación por cobertura para respaldar la selección del esquema de localización con mejor desempeño y orientar la priorización de zonas críticas en etapas posteriores de implementación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Juan Camilo López Vargas, Doctor en Ingeniería. Codirectora: Verónica Duque Uribe, Doctora en Ingeniería.

Abstract

Title: Location of temporary medical centers for seismic event scenarios in the city of Bucaramanga based on a multi-phase model using clustering and solution algorithms*

Author: Ana María López Saltarin, Juan Sebastián Ayala Galvis **

Key Words: Logistics, clustering, location, Temporary Medical Centers (TMC)

Description: The medical response following an earthquake disaster requires proactive location decisions to define temporary care points capable of meeting a potentially high demand under accessibility constraints related to infrastructure and mobility damage. This study addresses the location of these points in the city of Bucaramanga by characterizing neighborhoods using socioeconomic data and building damage information to approximate relative vulnerability and expected impact. This project develops and evaluates a multi-phase model to propose comparable location schemes for Temporary Medical Centers (TMCs) and quantify their performance through coverage. The methodology integrates three stages: (i) territorial segmentation of 206 neighborhoods using k-medoid clustering (PAM), where k represents the number of clusters defined for the city; (ii) estimation of potential demand associated with the expected number of victims and determination, for each cluster, of a representative location using a weighted centroid, and (iii) performance evaluation using a coverage indicator, where a neighborhood is considered served if its centroid is located within the service radius of the CMT of its respective cluster. Scenarios k=2, k=3, and k=5 are compared; among those evaluated, k=5 presents the best aggregate coverage performance (88.05%) and a more balanced spatial distribution of care. Thus, the model provides a reproducible procedure that integrates socio-spatial segmentation, demand estimation, and coverage evaluation to support the selection of the best-performing location scheme and guide the prioritization of critical areas in later implementation stages.

* Degree project

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering, School of Industrial and Business Studies. Director: Juan Camilo López Vargas, PhD in Engineering. Co-director: Verónica Duque Uribe, PhD in Engineering.

Introducción

En 2024 alrededor del mundo se registraron 393 desastres naturales, los cuales dejaron un balance de 16.753 muertes, afectaron a 167,2 millones de personas y generaron pérdidas económicas por 241.950 millones de dólares, según datos presentados por el CRED en 2025. Aunque la ocurrencia de terremotos disminuyó comparado con años anteriores, continúan destacándose como una de las amenazas más letales. El evento sísmico más significativo del año tuvo lugar el 1 de enero en Japón, dejando 551 fallecidos y pérdidas económicas de 15.000 millones de dólares, siendo así el tercer desastre más costoso de 2024 (CRED, 2025).

De ahí surge la necesidad de brindar una preparación y una respuesta adecuada ante escenarios de desastre, como es el caso de los terremotos que no solamente generan afectaciones humanas y económicas, sino que también conllevan una complejidad logística cuando suceden en áreas densamente pobladas. Por ello, se ha desarrollado la logística humanitaria para gestionar eficientemente los desastres, como el estudio de actividades correspondientes a la planificación de la atención médica que implica tomar decisiones sobre la ubicación de diferentes instalaciones, entre ellas los centros médicos temporales (CMT) que permiten ampliar la cobertura, reducir tiempos de atención y descongestionar hospitales colapsados tras el desastre (Ahmadi-Javid et al., 2017; Oksuz & Satoglu, 2024).

Bajo esta perspectiva, la localización de CMT se consolida como un problema de decisión con implicaciones directas en el desempeño de la respuesta, ya que determina qué porción de la demanda potencial puede ser atendida dentro de radios de accesibilidad y bajo condiciones no favorables de movilidad. La literatura muestra que el problema ha sido abordado mediante enfoques de modelación diversos, orientados a capturar la incertidumbre del escenario post-

desastre y articular la localización con decisiones complementarias como asignación, transporte y priorización. Sin embargo, la evidencia aplicada se concentra en estudios de caso desarrollados mayoritariamente en contextos asiáticos como Turquía, Irán y China (Carnero Quispe et al., 2025). Esto evidencia una brecha significativa de estudios adaptados a contextos latinoamericanos, donde la exposición al riesgo sísmico es alta y las condiciones territoriales presentan particularidades logísticas relevantes, como es el caso de Colombia.

En particular, Bucaramanga es un caso relevante por su ubicación sobre el Nido Sísmico de Bucaramanga y la recurrencia de eventos que han impactado su área metropolitana. Sin embargo, las estrategias locales se orientan principalmente a protocolos generales, sin incorporar herramientas cuantitativas que soporten la decisión de localización y permitan evaluar el desempeño territorial en términos de cobertura. Por ello, este proyecto propone un modelo multi-fase para apoyar la decisión de localización de centros médicos temporales (CMT) en la ciudad de Bucaramanga. El modelo integra enfoques basados en clusterización y algoritmos de solución, con el fin de proponer esquemas de localización a partir de la segmentación del territorio en clústeres geográficamente coherentes y con perfiles similares de vulnerabilidad, para definir una ubicación representativa del CMT por clúster. De modo que, se pueda evaluar la cobertura en la ciudad y las zonas vulnerables ante escenarios sísmicos, y se realiza un aporte por reducir la brecha de estudios que se aplican en contextos de Latinoamérica, al tiempo que se incorpora la clusterización como una fase del modelo, ya que presenta una implementación limitada en la revisión realizada a pesar de su potencial aplicación para agrupar puntos de demanda.

Con este enfoque, el presente trabajo desarrolla un modelo multi-fase orientado a proponer y comparar esquemas de localización de Centros Médicos Temporales (CMT) en Bucaramanga bajo escenarios sísmicos, integrando la segmentación territorial mediante clusterización, la

definición de ubicaciones representativas y la evaluación del desempeño por cobertura. En cuanto a la organización del documento, primero se presentan las generalidades del proyecto y el problema que motiva el estudio; luego se establecen las bases conceptuales y la selección de herramientas de modelación que sustentan el enfoque adoptado. A partir de ello, se expone el desarrollo del modelo y su aplicación al contexto de Bucaramanga, para posteriormente validar y evaluar los esquemas obtenidos. Finalmente, se discuten los resultados no solo a nivel de cobertura sino en función de su utilidad para la planificación de la respuesta y se cierra con las conclusiones, aportes y recomendaciones derivadas del trabajo.

Cumplimiento de objetivos

En esta sección se presenta en la Tabla 1, en la cual se sintetiza el cumplimiento de los objetivos definidos en el proyecto, así como el capítulo y la sección del documento en los que cada uno de ellos es abordado.

Tabla 1

Cumplimiento de objetivos

Objetivos específicos	Cumplimiento
Identificar la relevancia científica del problema de localización de centros médicos temporales ante desastres sísmicos, así como los enfoques metodológicos, variables clave, tendencias y vacíos presentes en la literatura especializada.	Capítulo 2.
Analizar herramientas de modelación disponibles para la solución del problema que se adapten al contexto de estudio de la ciudad de Bucaramanga, incluyendo enfoques basados en clusterización y algoritmos de solución.	Capítulo 3.

Tabla 1 (continuación)

Desarrollar un modelo multi-fase con base en las herramientas seleccionadas que representen la decisión clave de localización de centros médicos temporales en la ciudad de Bucaramanga para evaluar la cobertura en zonas de alto riesgo ante eventos sísmicos.	Capítulo 4.
Validar la consistencia y representatividad del modelo desarrollado en función de su capacidad de reflejar adecuadamente la cobertura en el problema de localización de centros médicos temporales en Bucaramanga.	Capítulo 5: sección 5.1.
Evaluar esquemas de localización a través del modelo formulado discutiendo los resultados sobre la cobertura en zonas vulnerables ante el riesgo sísmico en la ciudad de Bucaramanga.	Capítulos 5: sección 5.2 y Capítulo 6.
Consolidar los resultados obtenidos de la investigación en un artículo académico de carácter publicable que permita la divulgación de los avances realizados en el problema de localización ante desastres en el contexto de Bucaramanga.	Apéndice H.

1. Generalidades del proyecto

1.1 Planteamiento del problema

El aumento en la frecuencia y la intensidad de los desastres generados por eventos naturales o antrópicos ha llevado al desarrollo de la logística humanitaria para gestionar estos escenarios, donde se ve afectado el bienestar de las poblaciones a nivel físico, social y económico (Camacho-Vallejo et al., 2015). De los eventos naturales catalogados como críticos, se destacan los terremotos por su capacidad potencial de generar consecuencias inmediatas en la infraestructura, afectando simultáneamente las redes hospitalarias, la malla vial, los servicios básicos y las telecomunicaciones. A su vez, producen una alta demanda de personas afectadas que llegan a superar la capacidad instalada del territorio (Oksuz & Satoglu, 2024; Olgun & Ozcelik, 2024).

A este contexto, se debe añadir la incertidumbre asociada con la severidad e impacto sobre las áreas más vulnerables ante la ocurrencia de este tipo de evento. De ahí surge la necesidad de aplicar la logística humanitaria para la toma de decisiones estratégicas, como es el caso de localizar centros médicos temporales (CMT). Estas instalaciones son de carácter provisional y tienen como propósito descongestionar hospitales colapsados, mejorar los tiempos de atención y asegurar la continuidad mínima del sistema, aspectos que resultan determinantes para minimizar la morbilidad y mortalidad, especialmente durante las primeras 72 horas posteriores al evento (Ahmadi-Javid et al., 2017; Gulzari & Tarakci, 2021).

En la literatura se presentan diferentes enfoques para localizar CMT, entre los que se encuentran modelos MILP, programación estocástica, difusa y simulación híbrida. Estos enfoques buscan priorizar zonas críticas, garantizar la accesibilidad y maximizar la demanda atendida con el fin de brindar una respuesta eficiente ante escenarios de colapso a nivel hospitalario (Ahmadi-Javid et al., 2017; Carnero Quispe et al., 2025). De forma complementaria, se presentan estudios que introducen modelos orientados a mejorar la estimación espacial de pérdidas humanas, incluyendo categorías críticas como personas atrapadas, y la evaluación de la eficiencia operativa mediante métodos multicriterio (Choukolaei, Ghasemi, et al., 2023; Hassanzadeh, 2019). Sin embargo, se evidencia un vacío de aplicación en países de Latinoamérica altamente expuestos ante el riesgo sísmico, como lo es Colombia, ya que la mayoría de estos estudios se han desarrollado y validado en contextos asiáticos, como Turquía, Irán, China, India y Taiwán (Carnero Quispe et al., 2025; Garrido et al., 2022).

Este vacío en la literatura resulta especialmente relevante en contextos como el de la ciudad de Bucaramanga, que presenta una amenaza sísmica por su ubicación sobre el denominado Nido Sísmico de Bucaramanga, donde existen fallas locales activas y una recurrencia histórica de

eventos que han impactado constantemente su área metropolitana (SGC, 2020). Por ello, este riesgo se reconoce como prioritario dentro de la ciudad, donde se identifican zonas de alta vulnerabilidad social y estructural, con urbanización informal en laderas y asentamientos precarios. A pesar de este diagnóstico inicial, la planificación municipal se limita a protocolos generales de evacuación, activación de albergues y fortalecimiento institucional, sin contemplar modelos de localización de CMT, la evaluación de cobertura médica post-sismo, ni herramientas logísticas que permitan anticipar escenarios de colapso sanitario y planificar una respuesta eficiente y oportuna (UMGRDCC, 2021). A nivel nacional, si bien se plantea a largo plazo implementar un programa de hospitales resilientes para reducir el riesgo en el sector salud, no existen lineamientos específicos ni guías técnicas para afrontar esta problemática a nivel de la ciudad o el departamento, dejando sobre las autoridades locales la responsabilidad de definir sus estrategias operativas (UNGRD, 2024).

Bajo este escenario, surge la necesidad de desarrollar un modelo de localización de centros médicos temporales adaptado al contexto de Bucaramanga, que integre enfoques basados en algoritmos de solución, análisis de zonas con alta vulnerabilidad y agrupación de demanda por zonas críticas, con el fin de mejorar la eficiencia, cobertura y capacidad de respuesta médica ante escenarios de eventos sísmicos. Para ello, este proyecto aborda el problema mediante la propuesta de un modelo multi-fase que, genere esquemas de localización a partir de una fase inicial de clusterización, definiendo un número de clústeres que permita formar grupos con alta concentración poblacional y niveles significativos de vulnerabilidad. Luego, con base en el número de clústeres definidos, en la fase de localización, se determina dónde ubicar los centros médicos temporales requeridos en Bucaramanga dentro de cada clúster, evaluando su cobertura en la ciudad y en las zonas más vulnerables ante este riesgo.

1.2 Objetivos

En esta sección se presentan los objetivos del proyecto, los cuales orientan el desarrollo del trabajo y delimitan su alcance.

1.2.1 *Objetivo general*

Proponer esquemas de localización de centros médicos temporales para evaluar la cobertura en zonas de alto riesgo ante eventos sísmicos en la ciudad de Bucaramanga, a partir de un modelo multi-fase basado en clusterización y algoritmos de solución.

1.2.2 *Objetivos específicos*

1. Identificar la relevancia científica del problema de localización de centros médicos temporales ante desastres sísmicos, así como los enfoques metodológicos, variables clave, tendencias y vacíos presentes en la literatura especializada.
2. Analizar herramientas de modelación disponibles para la solución del problema que se adapten al contexto de estudio de la ciudad de Bucaramanga, incluyendo enfoques basados en clusterización y algoritmos de solución.
3. Desarrollar un modelo multi-fase con base en las herramientas seleccionadas que representen la decisión clave de localización de centros médicos temporales en la ciudad de Bucaramanga para evaluar la cobertura en zonas de alto riesgo ante eventos sísmicos.
4. Validar la consistencia y representatividad del modelo desarrollado en función de su capacidad de reflejar adecuadamente la cobertura en el problema de localización de centros médicos temporales en Bucaramanga.
5. Evaluar esquemas de localización a través del modelo formulado discutiendo los resultados sobre la cobertura en zonas vulnerables ante el riesgo sísmico en la ciudad de Bucaramanga.

6. Consolidar los resultados obtenidos de la investigación en un artículo académico de carácter publicable que permita la divulgación de los avances realizados en el problema de localización ante desastres en el contexto de Bucaramanga.

1.3 Resultados esperados

A partir del cumplimiento de los objetivos durante el desarrollo del proyecto se esperan los resultados presentados en la Tabla 2:

Tabla 2

Resultados esperados de acuerdo con los objetivos

Objetivo	Resultados esperados
1. Identificar la relevancia científica y vacíos del problema.	Aproximación en la comprensión del estado del arte relacionado con la logística humanitaria, en especial sobre la relevancia del problema de localización de instalaciones ante escenarios de desastres sísmicos y la importancia de aplicación en contextos como el Bucaramanga.
2. Analizar las herramientas de modelación aplicables.	Marco de comparación de las diferentes herramientas de modelación presentadas en la literatura, resaltando la clusterización como una herramienta para segmentar zonas de demanda junto a los algoritmos de solución para el desarrollo del modelo.
3. Diseñar un modelo multi-fase para el problema de localización.	Estructura formal del problema caracterizado mediante parámetros de entrada que caracterizan la ciudad y brindan salidas que son relevantes para la toma de decisiones. Procedimiento computacional definido que permite solucionar el modelo y genera esquemas de localización.
4. Validar la precisión y representatividad del modelo.	Evidencia sobre la validez del modelo propuesto, su lógica verificada y coherencia en las soluciones brindadas. Modelo final para la toma de decisiones del problema de localización que se va a aplicar en el contexto de Bucaramanga.
5. Evaluar esquemas de localización mediante el modelo.	Aprendizajes sobre los distintos esquemas de localización propuestos para el contexto de Bucaramanga, donde se evalúa la cobertura en las zonas más vulnerables ante el riesgo sísmico en la ciudad.
6. Consolidar los resultados en un artículo académico.	Consolidación de los hallazgos en productos académicos que documenten el proceso investigativo, la solución modelada y sus implicaciones prácticas materializados en una tesis de pregrado y un artículo académico de carácter publicable.

1.4 Metodología

Para dar cumplimiento al objetivo de investigación planteado, se definen seis fases para el proyecto que se adaptan del enfoque metodológico presentado por Hillier y Lieberman (2010).

1.4.1 *Revisión y caracterización del problema desde la literatura especializada*

Se inicia con una revisión de literatura para identificar la relevancia del problema de localización de centros médicos temporales ante eventos sísmicos y caracterizarlo en contextos como la ciudad de Bucaramanga. Por ello, se definen las siguientes actividades.

-Actividad 1 Definir palabras clave relacionadas con desastres sísmicos, localización de instalaciones médicas temporales y logística humanitaria para construir la ecuación de búsqueda.

-Actividad 2 Ejecutar la ecuación de búsqueda en bases de datos como Scopus y Web of Science, y realizar un análisis bibliométrico de la información general encontrada.

-Actividad 3 Refinar los resultados de búsqueda mediante filtros que acoten los documentos encontrados a la temática específica de interés del proyecto.

-Actividad 4 Revisar la literatura seleccionada y clasificar los artículos de acuerdo con la información relevante relacionada con los enfoques metodológicos, la instalación ubicada, el tipo de incertidumbre considerada y la validación aplicada.

-Actividad 5 Identificar tendencias investigativas relevantes, enfoques emergentes, vacíos metodológicos o de aplicación en contextos de ciudades en Latinoamérica como Bucaramanga.

-Actividad 6 Redactar una síntesis sobre los enfoques metodológicos, variables clave y vacíos identificados en los estudios revisados, destacando su pertinencia para orientar la caracterización del problema aplicado en el contexto de Bucaramanga.

1.4.2 Análisis de herramientas de modelación

A partir de la información obtenida, se revisan y comparan las técnicas de modelación que sean aplicables al problema de localización, en especial métodos de clusterización y procedimientos algorítmicos de solución que permiten estructurar espacialmente la demanda y generar esquemas de localización, considerando su aplicabilidad en contextos de desastre y su coherencia con el alcance del proyecto. Se siguen las siguientes actividades.

-Actividad 1 Identificar los principales enfoques utilizados en la literatura para apoyar la toma de decisiones asociadas a la localización de instalaciones médicas temporales ante eventos sísmicos.

-Actividad 2 Revisar técnicas de clusterización empleadas para la segmentación de zonas de demanda, evaluando su capacidad para integrar variables socioeconómicas y espaciales asociadas con la vulnerabilidad de la ciudad ante sismos.

-Actividad 3 Revisar métodos de solución para localizar instalaciones a partir de una estructuración previa de la demanda, evaluando su aplicabilidad para la generación de esquemas de localización de centros médicos temporales.

-Actividad 4 Comparar las herramientas analizadas y seleccionar aquellas más adecuadas para el diseño del modelo multi-fase, de acuerdo con los objetivos del proyecto y la disponibilidad de información.

1.4.3 Diseño del modelo multi-fase de localización

En esta fase se formaliza la estructura general del modelo multi-fase, estableciendo las etapas necesarias para caracterizar la demanda, estructurar espacialmente la ciudad y generar esquemas de localización de centros médicos temporales. Las actividades por desarrollar son:

-Actividad 1 Definir la estructura del modelo multi-fase con base en las herramientas de modelación seleccionadas.

-Actividad 2 Establecer la unidad de análisis, las variables de entrada y las fuentes de información requeridas para representar las condiciones socioeconómicas, demográficas y de vulnerabilidad de la ciudad.

-Actividad 3 Definir el procedimiento general para la estimación de la demanda potencial de atención médica bajo un escenario sísmico en la ciudad de Bucaramanga.

-Actividad 4 Implementar el proceso de estructuración espacial de la demanda mediante técnicas de clusterización, con el fin de poder generar distintos escenarios para la ciudad.

-Actividad 5 Definir el procedimiento para la generación de esquemas de localización de centros médicos temporales a partir de la clusterización de la ciudad.

-Actividad 6 Definir los criterios e indicadores para la evaluación de la cobertura de la demanda potencial, incluyendo la determinación del radio de cobertura asociado a cada esquema de localización.

-Actividad 7 Implementar el modelo multi-fase en un entorno computacional, definiendo el software y el lenguaje de programación a utilizar, así como las estructuras de datos, los pasos secuenciales del procedimiento y las salidas esperadas.

1.4.4 Validación del modelo propuesto

La intención es verificar la coherencia interna del modelo multi-fase y los resultados generados, evaluando su comportamiento desde una perspectiva lógica, espacial y metodológica. Se realizan las siguientes actividades.

-Actividad 1 Ejecutar el modelo y verificar la consistencia de los resultados obtenidos, asegurando la correcta interacción entre la estimación de la demanda, la estructuración espacial y la generación de esquemas de localización.

-Actividad 2 Realizar ajustes al modelo en caso de identificar inconsistencias o comportamientos que no representen adecuadamente el contexto y la vulnerabilidad de la ciudad.

1.4.5 Evaluación de esquemas de localización a través del modelo

Se evalúa el desempeño del modelo mediante la comparación de los esquemas de localización de acuerdo con los distintos escenarios de clusterización para la ciudad. Se definen las siguientes actividades.

-Actividad 1 Definir los escenarios correspondientes a los esquemas de localización a evaluar.

-Actividad 2 Ejecutar el modelo para los escenarios definidos.

-Actividad 3 Analizar los resultados obtenidos en términos de cobertura de la demanda potencial estimada.

-Actividad 4 Comparar los resultados entre los distintos esquemas de localización evaluados.

-Actividad 5 Formular conclusiones a partir de los resultados obtenidos.

1.4.6 Presentación de los resultados

Por último, se presenta todo el proceso realizado en este proyecto a través de dos entregables que se presentan a continuación.

-Actividad 1 Sintetizar el proceso de investigación mediante la redacción del libro de proyecto de grado de investigación.

-Actividad 2 Elaborar el artículo académico de carácter publicable que contenga el proceso y los resultados más importantes de la investigación.

2. Revisión de la literatura

2.1 Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico es una metodología que analiza información asociada a las publicaciones y la literatura científica a través de indicadores como citas, coautorías y palabras clave. A partir del uso de herramientas estadísticas y de visualización, se identifican patrones de publicación, estructuras temáticas y tendencias emergentes (Mukherjee et al., 2022).

Con el fin de realizar una revisión bibliométrica de la literatura, se inicia con la formulación de la ecuación de búsqueda que incorpora los criterios necesarios para identificar fuentes que contengan información relevante y estén alineadas con el objetivo de investigación de este proyecto.

El proyecto se centra en cuatro conceptos principales: logística humanitaria, problemas de localización, terremotos y organización de la atención médica, tal como se presenta en la Tabla 3. Aunque el proyecto se centra en la localización, se incluye el término “asignación” en la búsqueda porque en la literatura se suelen modelar ambos problemas de forma conjunta, lo que permite identificar estudios con enfoques integrados que, aun sin ser adoptados en su totalidad, aportan elementos metodológicos útiles. La ecuación de búsqueda emplea el operador AND para asegurar que los cuatro términos sean abordados y el operador OR con sinónimos y expresiones equivalentes para cada concepto, con el fin de obtener un conjunto inicial de documentos suficientemente amplio para la selección de los documentos finales de la revisión de literatura.

Tabla 3*Estructuración de ecuación de búsqueda*

Criterios de búsqueda			
Logística humanitaria	Terremotos	Localización	Organización Atención médica
Respuesta ante desastres	Terremoto(s)	Ubicación	Hospital(es)
Auxilio en caso de desastres	Sísmico(s)	Asignación	Atención médica
Respuesta de emergencias			Centro(s) médico(s)
Logística humanitaria			
Cadena de suministro humanitario			

Finalmente, los conceptos presentados en la Tabla 3 se organizan de forma estructurada y se obtiene la siguiente ecuación de búsqueda:

- ("Disaster response" OR "Disaster Relief" OR "Emergency response" OR "humanitarian logistics" OR "humanitarian supply chain") AND (earthquake* OR seismic*) AND (location OR allocation) AND (hospital* OR healthcare OR "Health care" OR "Medical Center*")

Una vez formulada la ecuación de búsqueda, se procede a consultar las bases de datos Scopus y Web of Science. En primer lugar, se recuperan los resultados en bruto de la consulta, sin aplicar filtros de selección, con el propósito de realizar una caracterización bibliométrica del panorama general de publicación asociado a la temática y describir sus patrones más visibles. Posteriormente, a partir de ese conjunto inicial, se desarrolla una etapa diferenciada de depuración y selección orientada a consolidar la evidencia pertinente que sustenta la revisión de literatura, de manera que el conjunto final de artículos se define con criterios específicos y se presenta en la sección 2.1.4.

2.1.1 Publicaciones por país

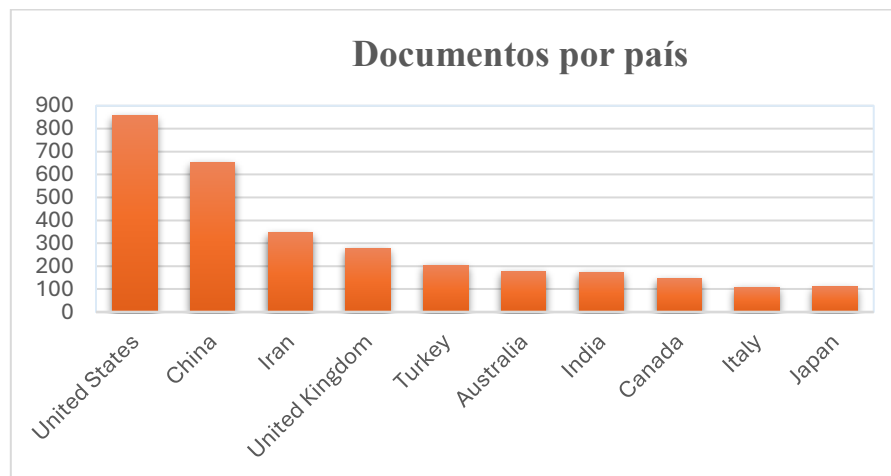
Al ingresar la ecuación de búsqueda en Scopus, buscando los criterios en todos los campos, se encontraron 3.049 documentos, mientras que en Web of Science se obtienen 68. A partir de

ello, se decide unificar los resultados de ambas bases, eliminando aquellos que se encuentren duplicados entre ellas para realizar así un análisis bibliométrico que integre la producción científica de cada una, obteniendo así 3.061 documentos.

Al revisar cómo es el comportamiento de la producción de literatura por país en la Figura 1, se encuentra que Estados Unidos, China e Irán destacan por mayor número de documentos publicados en este tema de investigación, lo que sugiere un mayor interés y apoyo investigativo en estas regiones. Además, si se revisan los países que les siguen en cuanto a cantidad de documentos publicados, se observa que ninguno de ellos pertenece a Latinoamérica, reflejando un vacío de investigación respecto al tema de este proyecto en países como Colombia.

Figura 1

Métrica de documentos publicados por país



Nota. Adaptado de Scopus y Web of Science, abril 2025.

2.1.2 Evolución de publicaciones por año

En la Figura 2, se muestra el comportamiento de los documentos publicados por año. Aquí se evidencia que a partir del 2006 se dan las primeras publicaciones por este tema y en los siguientes años el comportamiento es estable con pequeñas fluctuaciones. Sin embargo, a partir del 2018 se observa una tendencia clara de crecimiento sostenido año tras año hasta el 2024. En el

primer cuatrimestre de 2025 se publicaron 189 documentos, lo que sugiere que, de mantenerse esta tendencia, se puede igualar o superar la cifra de 519 publicaciones del año anterior. Esto refleja que el tema de investigación mantiene un interés vigente que se ha ido profundizando en los últimos años, probablemente impulsado por la creciente ocurrencia de desastres, como los eventos sísmicos de gran magnitud y la necesidad de una respuesta eficiente en las distintas etapas de gestión ante desastres.

Figura 2

Métrica de documentos publicados por año



Nota. Adaptado de Scopus y Web of Science, abril 2025.

2.1.3 Análisis de las palabras clave

Con el fin de analizar las palabras clave presentes en los documentos revisados, se exportan todos los resultados a formato CSV y a través del uso de la herramienta VOSviewer se realiza un análisis de redes para identificar los términos más relevantes relacionadas con los criterios de búsqueda, el resultado de este análisis se muestra en la Figura 3. Allí se pueden observar grupos temáticos diferenciados por colores, donde se resaltan las palabras clave asociadas con: gestión de desastres, logística humanitaria, respuesta a desastres, resiliencia y terremotos. Esto refleja un

2.1.4 Selección de artículos

Con el fin de realizar una correcta revisión de literatura se decide aplicar filtros para enfocar los resultados en el tema central de investigación a partir de los documentos que son únicos en cada base de datos y así seleccionar los que se van a revisar.

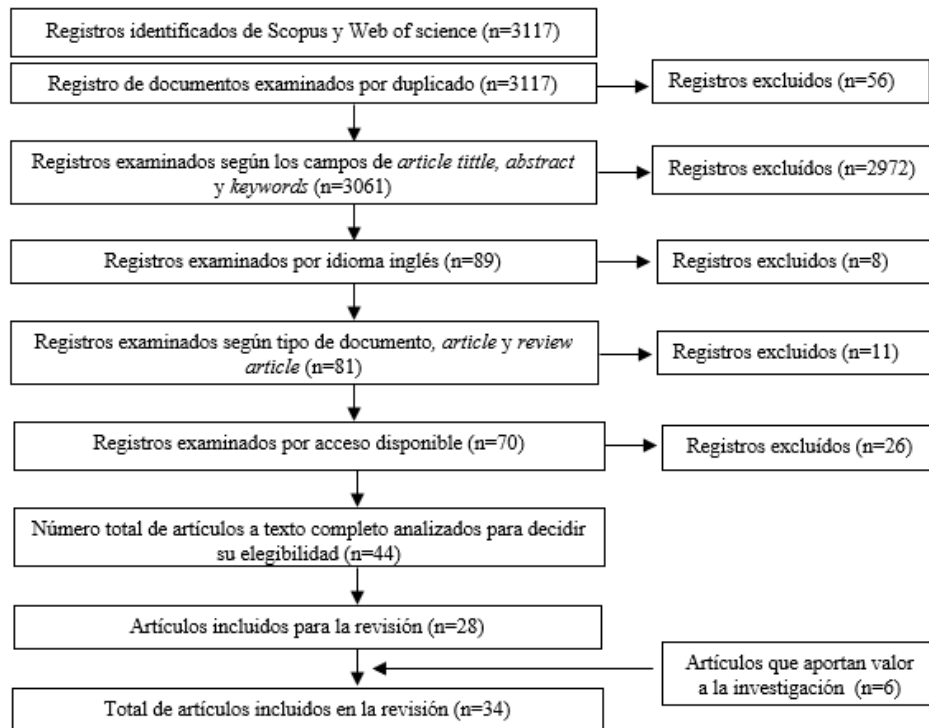
El primer filtro que se aplica es la restricción de la búsqueda a los campos de título del artículo, resumen y palabras clave en ambas bases de datos, con esta acción los resultados sobre la cantidad de documentos encontrados se reducen a 75 en Scopus y 14 en Web of Science.

Luego, se revisan los idiomas de los resultados que se obtienen y se evidencia variabilidad entre ellos, por esto, se opta por trabajar únicamente con aquellos documentos que estén en inglés, con lo que se obtienen 68 en Scopus y 13 en Web of Science.

Se aplica como tercer filtro el tipo de documento, donde se selecciona artículo o artículo de revisión con el fin de obtener información científica novedosa y análisis referentes a la literatura existente sobre el tema de investigación. Con esto, la cantidad final de artículos se reduce a 58 en Scopus y 12 en Web of Science.

Posteriormente con el fin de garantizar el acceso a la información, se realiza la verificación del acceso a cada uno de los artículos. Este proceso determina que no hay acceso a 26 documentos, por lo tanto, la lista se reduce a 44 artículos.

Finalmente, se lleva a cabo un proceso de evaluación cualitativa, en el que se analiza el resumen de cada artículo para determinar su relevancia en el contexto del estudio. En la Figura 4, se resume el proceso realizado con el que se obtienen los 34 artículos que constituyen la base documental para el desarrollo de la revisión de la literatura.

Figura 4*Selección de estudios mediante bases de datos y registros*

2.2 Análisis de la literatura

La revisión de literatura se organiza en cinco secciones donde se discuten los hallazgos abordados dentro de los artículos que se relacionan con logística humanitaria, los tipos de instalaciones consideradas, los enfoques metodológicos empleados, los resultados más relevantes y las tendencias de investigación futuras.

2.2.1 *Logística humanitaria y las fases del desastre*

La logística humanitaria ha surgido dentro de la literatura como una disciplina fundamental para atender poblaciones que se ven afectadas por la ocurrencia de desastres, a través de actividades que permiten planificar, transportar y distribuir recursos, infraestructura y servicios (Thomas & Kopczak, 2005; Camacho-Vallejo et al., 2015).

Su implementación es crucial a escala global, dado que se observa un incremento no solo en la frecuencia sino también en la severidad de los desastres, ya sean naturales o causados por el ser humano. En este escenario, se presenta la necesidad de tomar decisiones estratégicas como la de establecer centros médicos temporales con el objetivo de garantizar un servicio de atención oportuno y eficiente para un gran número de personas lesionadas (Oksuz & Satoglu, 2024).

Además, dentro de la literatura se reconoce que la ocurrencia de eventos sísmicos de gran escala puede afectar al mismo tiempo infraestructuras críticas, redes hospitalarias, vías de acceso y comunicaciones, lo que dificulta la logística médica en situaciones de emergencia. De este modo, el hecho de decidir dónde se ubicarán los CMT, no solo afecta la cobertura y la accesibilidad, sino que también repercute directamente en la eficiencia de la respuesta para garantizar la continuidad de la atención sanitaria, principalmente (Zhang et al., 2025a).

Dentro de las etapas en la gestión de desastres: mitigación, preparación, respuesta y recuperación; se contempla el problema de localización en la fase de preparación mediante la planificación, el análisis de riesgos y el diseño de estrategias de respuestas; sin embargo, también se considera como una decisión a tomar inmediatamente después de la ocurrencia del desastre en la fase de respuesta (Ayvaz & Kuşakci, 2019).

En el caso de Kilci et al. (2015) proponen un modelo que mejora las decisiones de ubicación de refugios antes del evento, con el fin de activar estos espacios tan pronto ocurra el desastre. Sin embargo, dada la necesidad de flexibilidad ante contextos de alta incertidumbre, el problema se puede abordar inicialmente en la etapa de preparación, pero activarse y adaptarse en tiempo real durante la respuesta. Mientras que otros autores como Oksuz & Satoglu (2020) señalan explícitamente que su modelo se ubica en la etapa posterior al desastre cuando es necesario instalar CMT para descongestionar hospitales colapsados. Por su parte Gulzari & Tarakci (2021) abordan

la ubicación de instalaciones temporales de salud junto con la asignación médica y niveles de tecnología, todo ello como respuesta al colapso del sistema tras un sismo severo. Por lo tanto, se evidencia que en la literatura este problema puede ser abordado desde ambas perspectivas y no está ligado a una única fase. Aun así, el presente proyecto se enmarca en la etapa de preparación, porque su finalidad es anticipar la decisión de localización mediante esquemas comparables definidos con información previa del territorio, de forma que, cuando ocurra el sismo, la respuesta no dependa de iniciar el análisis desde cero, sino de activar una alternativa ya evaluada y ajustarla con la información disponible del evento.

2.2.2 Tipos de instalaciones abordadas

A pesar de que este proyecto se enfoca en centros médicos temporales, en la literatura revisada se abordan distintos tipos de instalaciones que responden a criterios de decisión similares: cobertura, vulnerabilidad de la población, facilidad de acceso y restricciones operativas. En lo que corresponde a los centros médicos temporales, estos se clasifican como instalaciones de salud y su importancia se refleja en escenarios posteriores al desastre o crisis humanitarias. Dentro de sus características se resaltan: rápida respuesta, capacidad limitada y ubicación estratégica cercana a las zonas afectadas tras el evento y a diferencia de las instalaciones permanentes, los CMT son instalaciones móviles o provisionales adaptables según la necesidad (Ahmadi-Javid et al., 2017).

Otras instalaciones han sido abordadas debido a su importancia en la atención integral a desastres. Trivedi & Singh (2017) consideran los refugios de emergencia para personas desplazadas, con el fin de brindar alojamiento seguro y acceso a recursos básicos, que, si bien no trata de una instalación sanitaria, son esenciales para reducir la carga hospitalaria, pues permite la redistribución de la población vulnerable. Por otro lado, los puntos de recolección de heridos cumplen la función de priorizar y clasificar las víctimas, brindar atención inicial y evacuación de

personas afectadas tras el evento ocurrido. En este orden de ideas, operan como un filtro logístico entre los centros médicos y el lugar donde ocurre el evento, mejorando el tiempo de atención (Chang et al., 2023).

También se observa el interés de ubicar centros de socorro debido a que son instalaciones con múltiples funciones evaluadas en la fase preparación, su función integra servicios básicos, alimentos, agua, atención médica y almacenamiento de suministros. Están diseñadas para la distribución y coordinación de ayuda tras un desastre; para ubicar estas instalaciones se tiene en cuenta factores como la accesibilidad de la población. A diferencia de los refugios de emergencia, los centros de socorro están pensados como área logística para atención en las horas críticas del desastre (Choukolaei, Mirani, et al., 2023; Haeri et al., 2020).

Aunque no todos los modelos aplicados en la localización de las instalaciones descritas previamente se centran en la atención médica, su revisión es útil porque todas ellas capturan el comportamiento del sistema bajo condiciones críticas mediante enfoques con diferentes niveles de complejidad. Además, coinciden en que la localización temprana de estos servicios resulta determinante para minimizar la mortalidad y mejorar la eficiencia de la respuesta (Chang et al., 2023; Choukolaei, Ghasemi, et al., 2023; Trivedi & Singh, 2017).

2.2.3 *Enfoques Metodológicos*

Para una mejor visualización y síntesis de los artículos revisados que presentan modelos relacionados con el problema de localización, se construye la Tabla 4, tomando como referencia los enfoques metodológicos definidos por Ahmadi-Javid et al. (2017) que permiten identificar herramientas empleadas para modelar y solucionar el problema estudiado.

Tabla 4

Consolidación sobre los enfoques metodológicos de la literatura revisada.

Artículos	Enfoques de modelado ^a											Problema abordado			Caso de Estudio ^b						
	MILP	RO	SP-O	DP	O	FP	GP	MCDM	2-SSP	MILP	ILP	NLP	Descripción breve del modelo	L	A	O	S	N	I	O	LUGAR
Aydin & Cetinkale (2023)	✓												MILP multiperiodo, modelo compartimental.	✓	✓		✓				Bakırköy, Estambul
Ayvaz & Kuşakci (2019)						✓					✓		ILP difuso para localización para la imprevisibilidad de la demanda.	✓				✓			Üsküdar (Estambul)
Chang et al. (2023)			✓		✓								Simulación-optimización estocástico con optimización ORSA-APGHLS.	✓	✓		✓				Tainan (Taiwán)
Choukolaei, Mirani, et al. (2023)						✓		✓					MCDM: PROMETHEE + FCM para priorización de sitios.	✓				✓			Teherán con 30 sitios
(Ehsani et al., 2023)	✓					✓							MILP multiobjetivo, multiescalón, multiproducto, multiflota y multi-periodo, con IoT y lógica difusa.	✓				✓			Salas-e-Babajani (Irán)
Fereiduni & Shahanaghi (2017)		✓	✓										p-robusto multi-periodo con simulación Monte Carlo para localización y evacuación.	✓	✓	✓	✓				Teherán con múltiples escenarios
Garrido et al. (2022)								✓			✓		NLP, ANP para evaluación multicriterio.	✓					✓		Bogotá simulando terremoto 7.0
Ghasemi et al. (2019)	✓		✓		✓								MILP multiobjetivo, multiproducto, multi-periodo y multivehículo, heurísticas NSGA-II y MMOPSO.	✓	✓			✓			Distrito 1 de Teherán
Gulzari & Tarakci (2021)	✓												MILP determinista con triaje y niveles de niveles de telemedicina.	✓	✓			✓			Cachemira (Pakistán, 2005)
Haeri et al. (2020)						✓	✓	✓		✓			Programación binivel con lógica difusa (DEA + FGP).	✓	✓	✓	✓				Kermanshah (Irán, 2017)
Kadosh et al. (2023)			✓		✓								Simulación híbrida DES+ ABM que integra varios parámetros estocásticos.	✓					✓		Simulación post-terremoto
Kilci et al. (2015)	✓												MILP para balancear carga entre refugios.	✓				✓			Kartal (Estambul) y Van (2011)

Tabla 4 (continuación)

Artículos	Enfoques de modelado ^a											Problema abordado			Caso de Estudio ^b				
	MILP	RO	SP-O	DP	O	FP	GP	MCDM	2-SSP	MLP	ILP	NLP	Descripción breve del modelo	L	A	O	S I	N O	LUGAR
Mazloun et al. (2024)								✓					Programación estocástica de dos etapas, clustering de reducción de escenarios.	✓	✓	✓	✓		Teherán
(Niyazi & Behnamian, 2023)	✓												Modelo entero mixto multi-commodity con Big Data, minería de datos, UAVs y ruteo adaptativo.	✓	✓	✓	✓		Sarpol-e-Zahab (Irán)
Oksuz & Satoglu (2020)	✓							✓					MILP en dos etapas con escenarios de demanda.	✓	✓		✓		Kartal (Estambul)
Oksuz & Satoglu (2024)				✓				✓					Programación estocástica multiobjetivo, Markov de tiempo discreto para la evolución del estado de salud de los pacientes.	✓	✓	✓	✓		Kartal (Estambul)
Sun et al. (2021)		✓											Modelo robusto biobjetivo bajo incertidumbre.	✓	✓	✓	✓		Yushu (2010)
Sun et al. (2022)		✓											Modelo robusto biobjetivo de optimización (NSRB) con escenarios de interrupciones.	✓	✓	✓	✓		Wenchuan
Trivedi & Singh (2017)						✓	✓	✓					FAHP, GP para decisiones multicriterio cualitativas.	✓		✓	✓		Nepal
Yi & Özdamar, (2007)	✓												Flujo multi-commodity con asignación y ruteo dinámico.	✓	✓	✓	✓		Estambul
Zhang et al., (2025)	✓	✓											MILP robusto multinivel con priorización.	✓	✓		✓		Luding

Nota. ^a **MILP** (MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING), **FP** (FUZZY PROGRAMMING), **2-SSP** (TWO-STAGE STOCHASTIC PROGRAMMING), **RO** (ROBUST OPTIMIZATION), **SP-O** (OTHER STOCHASTIC PROGRAMMING), **DP** (DYNAMIC PROGRAMMING), **NLP** (NONLINEAR PROGRAMMING), **GP** (GOAL PROGRAMMING), **MCDM** (MULTI-CRITERIA DECISION MAKING), **O** (OTHER), **ILP** (INTEGER LINEAR PROGRAMMING) Y **MLP** (MULTI-LEVEL PROGRAMMING). ^b LOCALIZACIÓN (**L**), LOCALIZACIÓN CON ASIGNACIÓN (**A**), OTRAS DECISIONES: COMO PLANIFICACIÓN, TRANSPORTE, RUTEO, ENTRE OTROS (**O**).

Con base en la tabla presentada, se puede evidenciar que el MILP se presenta como el enfoque realizado en mayor medida con un 43%, posicionándose como estructura base en problemas de localización por su capacidad de representar decisiones discretas y múltiples

restricciones. Sin embargo, esto no implica el desarrollo de modelos simples, ya que se observa cómo varios autores emplean técnicas de optimización robusta o estocástica, ambas con cuatro apariciones cada una, y *fuzzy programming* con cinco artículos, lo que refleja un esfuerzo por capturar la incertidumbre inherente a los contextos de desastre en los modelos. También, existen enfoques menos frecuentes, como programación dinámica, de objetivos y no lineal, cada uno con solo una aparición, esto sugiere una menor tendencia de incorporación en los modelos.

Respecto a los objetivos formulados, se observa un desarrollo asociado con los enfoques de modelado que presentan una transición desde criterios puramente logísticos hacia medidas que consideran el impacto humanitario. Se encuentran problemas que como lo proponen Gulzari & Tarakci (2021) abordan el objetivo de minimizar la demanda insatisfecha, dando mayor peso a los heridos más graves, asimismo y en mayor medida los autores optan solo por minimizar el número de víctimas no atendidas, como lo plantean Oksuz & Satoglu (2024).

Desde una perspectiva más integradora, se vincula la eficiencia y el bienestar a través de la minimización al mismo tiempo del coste de la infraestructura y el sufrimiento social (Zhang et al., 2025), se muestra la necesidad e importancia de los modelos multiobjetivo, que permiten representar de forma simultánea estas decisiones. Así también lo hicieron Sun et al. (2021, 2022) quienes no solo minimizaron costos y tiempos, sino también maximizaron el número de víctimas atendidas y la cobertura o la resiliencia del sistema. En ocasiones el triaje es considerado como un factor dentro de la función objetivo, asignando un valor relativo a cada uno de los traslados (Oksuz & Satoglu, 2020).

Aunque el alcance del presente proyecto se enfoca exclusivamente en la localización de centros médicos temporales, dentro de la literatura se ha contemplado la integración del problema de localización, asignación y planificación de recursos, con el fin de modelar el sistema de atención

ante desastres de manera más realista. Se encuentra que, 6 de los artículos de la Tabla 4, se centran exclusivamente en la localización, mientras que los 15 restantes, integran decisiones adicionales como asignación de víctimas, rutas, planificación de personal o múltiples niveles logísticos.

Por último, en cuanto a la validación, 20 de los 21 artículos analizados incluyen algún tipo de estudio de caso, lo que evidencia el interés de evaluar los modelos en escenarios basados en contextos reales en zonas altamente expuestas a desastres sísmicos, con alta densidad urbana y condiciones logísticas complejas. Estos casos se ubican en Asia, en países como Turquía, Irán, China, India y Taiwán, sin embargo, sólo un estudio (4.8%) corresponde a Latinoamérica: Bogotá, Colombia, modelado en el contexto de un sismo de magnitud 7.0, reflejando un vacío en su aplicación para el contexto de Latinoamérica, específicamente el caso de Colombia.

2.2.4 *Resultados relevantes*

Los resultados evidenciados en la literatura, aparte de comprobar la funcionalidad de los modelos que se presentan en cada artículo, ofrecen criterios importantes a considerar con el fin de fortalecer el diseño y la validación de esquemas relacionados con la localización de centros médicos temporales ante escenarios de eventos sísmicos que generan incertidumbre.

Un resultado destacable es presentado por Oksuz & Satoglu (2020), quienes demuestran como el hecho de clasificar las víctimas mediante un proceso de evaluación permite mejorar la eficiencia del sistema, en especial su relación con la cobertura y asignación bajo condiciones inciertas como lo es la interrupción parcial del servicio. A pesar de que este proyecto no aborda la asignación ni el triaje, lo presentado por los autores sugiere que, al momento de tomar decisiones estratégicas relacionadas con localización, conviene considerar e identificar aquellas zonas con mayor densidad poblacional o concentración de pacientes críticos de acuerdo con su nivel de vulnerabilidad. En 2024, un nuevo estudio desarrollado por los mismos autores complementó lo

mencionado, ya que a través de un enfoque centrado en liberar la congestión de áreas críticas y garantizar la cobertura adecuada, se mostró un impacto positivo en la tasa de atención para zonas de alta demanda donde estudiaron múltiples escenarios y variaron el número de CMT requeridos (Oksuz & Satoglu, 2024).

Otro aspecto importante para considerar es que la toma de decisiones de localización no solo se realiza considerando los puntos más cercanos, sino que en lo posible se debe considerar la integración dentro de la red logística, añadiendo criterios de incertidumbre sobre posibles daños estructurales y la proporción de víctimas que pueden ser atendidas desde los diferentes puntos de demanda (Kadosh et al., 2023; Yi & Özdamar, 2007). Esto indica que en contextos como el que se estudia en este proyecto es importante conocer la distribución geográfica de las víctimas de acuerdo con las zonas más vulnerables.

2.2.5 Tendencias y vacíos de investigación

Además de las soluciones propuestas al problema de localización, los artículos presentan limitaciones en sus modelos y se señalan posibles rutas de investigaciones futuras, lo que permite identificar desafíos relacionados con la preparación y respuesta ante eventos sísmicos.

A lo largo de la revisión, gran parte de los artículos exponen la necesidad de avanzar hacia modelos dinámicos, de varias etapas y que sean flexibles para el contexto de desastre. Trivedi & Singh (2017) proponen que, para hacerle frente a la incertidumbre inherente al evento, se deberían formular modelos dinámicos y técnicas de optimización estocástica, mientras que Sun et al. (2022) plantean la necesidad de tomar en cuenta los daños en la infraestructura vial y desarrollar métodos heurísticos o exactos que solucionen esta consideración.

Otros autores reconocen como una limitación el uso de datos simulados, y no datos reales, además de las exclusiones de variables del entorno estudiado, En este contexto, Garrido et al.

(2022) proponen un modelo que se basa en datos simulados y juicio de expertos, sin contemplar los costos reales de reubicación ni la verificación posterior en un desastre real. En adición, (Hosseini et al., 2024) proponen como futura línea de investigación incluir un análisis que permita tomar decisiones en varios momentos del desastre, además de restricciones reales del entorno, como daños estructurales.

Al revisar las líneas de investigación futura propuestas por los autores, se evidencia que coinciden con los resultados de estudios de revisión de literatura, que destacan la integración de datos en tiempo real mediante herramientas Sistemas de Información Geográfica (GIS), la incorporación de criterios sociales, éticos y políticos en los modelos (Carnero Quispe et al., 2025) y la articulación de decisiones estratégicas, tácticas y operativas en un solo marco, con un mejor manejo de la incertidumbre a través de modelos estocásticos o difusos (Ahmadi-Javid et al., 2017). En cuanto al uso de técnicas de clusterización a pesar de su utilidad para agrupar puntos de demandas, se presenta una implementación limitada en la revisión realizada, ya que solo, Mazloun et al. (2024) aplicaron *clustering* retrospectivo como herramienta auxiliar. En consecuencia, el enfoque propuesto en este proyecto representa un aporte en este campo de estudio.

2.3 Marco de antecedentes

Es importante para este proyecto revisar tesis de grado que apliquen modelos desarrollados para la toma de decisiones de ubicación en escenarios posteriores a un desastre. Para esto, se deciden analizar tres trabajos que desde su objetivo particular presentan aportes metodológicos y resultados relevantes para el desarrollo de la investigación.

Entre los trabajos revisados, se encuentra que el reconocimiento del componente espacial y la caracterización de la región de estudio es un eje fundamental que se debe considerar para la toma de decisiones. Aquí se observan dos enfoques, por un lado, Arias (2024) destaca el proceso

de validación realizado mediante datos reales georreferenciados de albergues, centros médicos y comunas expuestas al riesgo sísmico en la ciudad de Santiago de Cali. Mientras que, Martínez (2021) presenta técnicas de análisis del espacio geográfico para localizar albergues en la ciudad de México por medio de mapas temáticos a través del software MapInfo Pro, que corresponde a un sistema de información geográfica. Sin embargo, difiere en las herramientas utilizadas, ya que en este trabajo se desarrolla una plataforma interactiva con ubicaciones mapeadas empleando clusterización, mientras que en el estudio de Arias (2024) se opta por un modelo que contempla variables de distancia, capacidad y restricciones sobre las condiciones de resistencia de los suelos.

Por otro lado, también se revisa el trabajo realizado por Carranza & Sánchez (2021) quienes desarrollan un modelo de optimización para ubicar centros de distribución y gestionar inventarios de suministros ante escenarios post desastre, considerando una demanda estocástica. Al igual que Arias (2024) se formula un modelo matemático con la diferencia que acá se emplean técnicas de algoritmo genético con búsqueda de vecindario variable (VNS) mediante un cromosoma multi-gen con el objetivo de no solo codificar la localización de centros de distribución, sino también integrar las decisiones de asignación de albergues y porcentajes de distribución de productos. A pesar de que este estudio no emplea datos reales georreferenciados como en el de Arias (2024), se destaca el proceso de validación realizado a través de escenarios de simulación basados en zonas de Bucaramanga, utilizando supuestos encontrados en un proceso de benchmarking de otros estudios que consideran niveles de evacuación ante sismos y el análisis de mapas de vulnerabilidad y zonificación para definir sectores con diferentes niveles de riesgo (Carranza & Sánchez, 2021).

Otro aspecto por resaltar es que, aunque ninguna de las tesis analizadas se enfoca directamente en la localización de centros médicos temporales, todas coinciden de forma general en que la localización es un problema de decisión crítico ante situaciones de emergencia. Además,

se destaca el factor social de estudio considerado por Carranza & Sánchez (2021) que incluyen el enfoque de minimizar los costos de privación que representan el sufrimiento de las personas asociados con la falta de acceso y se diferencia de los costos tradicionales de transporte, ubicación e inventario. Esto se alinea con las tendencias observadas dentro de la literatura en la que, los objetivos van más allá de lo económico y buscan una visión orientada al bienestar humano.

A partir de los trabajos revisados, se concluye que los modelos presentados por Carranza & Sánchez (2021) y Arias (2024) aportan una base metodológica útil para proyectos que consideren modelos de toma de decisiones de ubicación. A su vez, demuestran la viabilidad de aplicación en contextos como Bucaramanga que se caracterizan por una alta actividad sísmica y una distribución territorial heterogénea, teniendo en cuenta las características sociales y de vulnerabilidad sísmica de la ciudad. Mientras que el trabajo de Martínez (2021), a pesar de no formular un modelo matemático permite entender el sentido del clúster a partir del riesgo sísmico de la zona. Asimismo, muestra cómo la cantidad de instalaciones varía dependiendo del número de clústeres definidos y reafirma la importancia de la localización para visualizar de forma clara los sectores críticos y priorizar las acciones de respuesta ante una emergencia.

2.4 Marco teórico

A continuación, se presenta el marco teórico que reúne la base conceptual con la que se sustenta el desarrollo del proyecto, con el fin de enmarcar la formulación del modelo y la interpretación de los resultados. Para ello, se abordan conceptos asociados a desastres, gestión del riesgo y la vulnerabilidad ante sismos. Asimismo, se presenta la logística humanitaria y el problema de localización, elementos esenciales para comprender las condiciones bajo las cuales se planifica la respuesta operativa. Finalmente, se desarrollan los enfoques teóricos asociados con la localización, cobertura y clusterización, los cuales permiten integrar todos los conceptos

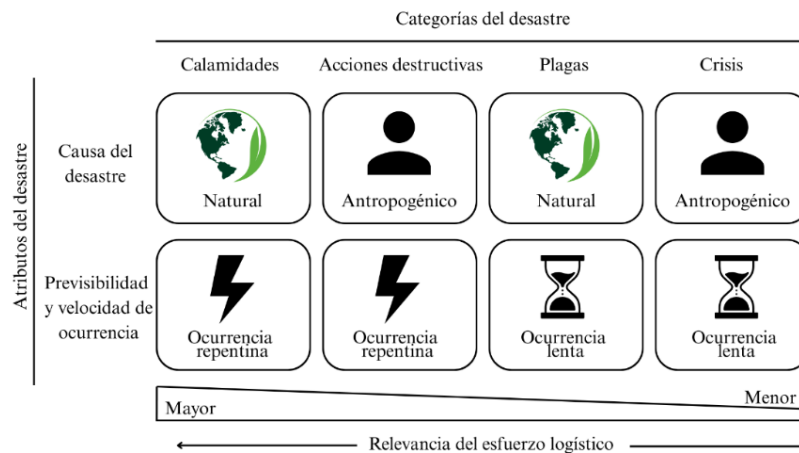
necesarios para segmentar el territorio, estimar una demanda potencial y definir los esquemas de localización de CMT en Bucaramanga.

2.4.1 Desastres

Un desastre se entiende como un evento que genera una interrupción grave en el funcionamiento de una comunidad o sociedad con pérdidas humanas, materiales, ambientales y económicas, que exceden la capacidad de la comunidad o sociedad afectada para afrontar este escenario con sus propios recursos. En general, es el resultado de combinar las amenazas latentes, las condiciones de vulnerabilidad y las limitaciones de capacidad o medidas para la reducción de las consecuencias negativas de este riesgo (Navalgund et al. 2011). Esta visión resulta clave dentro del proyecto porque evidencia que la planificación de la respuesta va más allá del evento sísmico, sino también depende de las condiciones del territorio que amplifican sus consecuencias.

2.4.1.1 Tipos de desastres. Según el esfuerzo logístico requerido, Cozzolino (2012) distingue cuatro tipos de desastres, desde aquellos de ocurrencia repentina y alta exigencia operativa hasta los de evolución lenta, como se presenta en la Figura 5.

Primero se encuentran las calamidades que se caracterizan por ser de causas naturales y una ocurrencia repentina, como los terremotos, huracanes y tornados. Le siguen las acciones destructivas, que tienen causas antropogénicas y una ocurrencia repentina, este es el caso de los atentados terroristas, golpes de estado y accidentes a nivel industrial. Por su parte, las plagas se producen por causas naturales y una ocurrencia de evolución lenta, como la hambruna, sequías y pobreza. Por último, las crisis se generan a partir de causas antropogénicas y de ocurrencia lenta, por ejemplo, las crisis políticas (Cozzolino, 2012).

Figura 5*Tipos de desastre*

Nota. Adaptado de Cozzolino (2012).

La anterior clasificación muestra que las calamidades y acciones destructivas representan un mayor esfuerzo logístico debido su imprevisibilidad, por lo que se requiere una respuesta rápida en las zonas afectadas. Asimismo, se evidencia que este proyecto se encuentra en la atención ante calamidades, como es el caso de los terremotos.

2.4.2 Vulnerabilidad urbana ante sismos

Se define como el grado de susceptibilidad de una población, infraestructura o sistema territorial a sufrir daños o pérdidas ante la ocurrencia de un evento sísmico (Ocola, 2005). Por ello, ante la posibilidad de ocurrencia de un evento sísmico, estudiar y comprender la vulnerabilidad adquieren un papel importante. Bajo este panorama, se concibe el concepto de naturaleza multidimensional frente al riesgo sísmico que integra componentes estructurales, sociales y económicos (Olcina, 2022).

-Condiciones Socioeconómicas. Incluyen variables asociadas al nivel de desarrollo, pobreza, desigualdad y acceso a recursos. Carmona et al., (2024) considera una relación directa entre las carencias sociales y la vulnerabilidad, además hace uso de indicadores locales entre ellos

el Índice de Marginación empleado como herramienta robusta para medir deficiencias en educación, salud y vivienda.

-Exposición demográfica. Hace referencia a la cantidad y distribución de población ubicada en zonas de amenaza sísmica. Variables como el número de habitantes, la densidad poblacional y la presencia de grupos etarios vulnerables influyen directamente en el impacto potencial de un evento sísmico, ya que un mayor número de personas expuestas incrementa la probabilidad de pérdidas humanas y sociales (Cutter et al., 2003).

-Condiciones de la Infraestructura. Enmarca las características del entorno construido, incluyendo la calidad, antigüedad y resistencia sísmica de las edificaciones. Además, las víctimas mortales y los heridos se asocian al colapso de estructuras vulnerables (Carmona et al., 2024; Ocola, 2005).

2.4.3 Logística humanitaria

Thomas & Kopczak (2005) introducen la definición de logística humanitaria, como el conjunto de actividades de planificar, implementar y controlar no solo el flujo y el almacenamiento eficiente y rentable de bienes y materiales, sino también de la información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto final en que se realiza el consumo, con el objetivo de aliviar el sufrimiento de las personas en condición de vulnerabilidad. En adición, Van Wassenhove (2006) afirma que un 80% del socorro en caso de desastres es cuestión de logística, por lo que, la única forma de realizar una correcta gestión ante estos escenarios es mediante operaciones logísticas eficientes y eficaces, lo que marca la diferencia entre tener una respuesta exitosa o fallida.

2.4.3.1 Fases en la logística humanitaria. En la gestión de desastres, las fases permiten diferenciar el tipo de decisiones que se toman antes, durante y después del evento.

Cozzolino (2012) menciona que existe un desacuerdo entre los autores sobre su estructuración y la nomenclatura empleada. Sin embargo, se coincide en la existencia de las fases mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5

Fases de la gestión de desastre

Mitigación	Aquí se encuentran las leyes y mecanismos que permiten reducir la vulnerabilidad social, es decir, se relaciona con la responsabilidad por parte de los entes gubernamentales y no implica una participación directa de la logística.
Preparación	Aquí se agrupan las operaciones realizadas en el periodo previo al desastre, con el objetivo de reducir el impacto de las consecuencias más graves. Se incorpora el diseño de estrategias que permitan una implementación exitosa durante la respuesta operativa y es importante porque durante esta fase se desarrolla: el diseño de la red física, los sistemas de tecnologías e información (TIC) y bases para la colaboración.
Respuesta	Hace referencia a las operaciones implementadas inmediatamente después del desastre con el objetivo de activar redes silenciosas o temporales y restablecer en el menor tiempo los servicios básicos y la entrega de bienes al mayor número de beneficiarios posible. En esta etapa, la coordinación y colaboración entre los actores involucrados es vital, donde las conexiones se realizan en la preparación, pero no se activan hasta la ocurrencia del evento.
Reconstrucción	Acá se encuentran las operaciones realizadas posteriores a un desastre con el objetivo de abordar el problema en el largo plazo, dado que los efectos del desastre persisten durante un largo periodo en las poblaciones afectadas.

Nota. Adaptado de Cozzolino (2012).

Con estas fases definidas en la Tabla 5, se identifica que el problema de localización estudiado en este proyecto se encuentra entre las etapas de preparación y respuesta, esto se debe a que corresponde a una decisión estratégica donde se deben proponer esquemas de localización que permitan una respuesta ágil ante este tipo de desastres que conllevan grandes esfuerzos logísticos, como es el caso de los terremotos.

2.4.4 *Problema de localización*

Para referirse a este problema, dentro de la literatura especializada se utiliza el término “*Facility Location*” que comprende la modelación y la resolución de una categoría de problemas que se desarrollan en un espacio específico donde se desea determinar la posición o ubicación de una o varias instalaciones que brindan un servicio o producto. Se caracterizan por cuatro componentes principales: los *puntos de demanda* donde se encuentran los clientes, las *nuevas instalaciones* que se van a ubicar entre los clientes, un *espacio de solución factible* en el que se van a distribuir los puntos de demanda y las instalaciones a ubicar, y un *criterio de medida* que indica las distancias o tiempos entre los clientes y las instalaciones (ReVelle & Eiselt, 2005).

2.4.4.1 Clasificación de los problemas de localización. De acuerdo con Thompkins et al. (2010) los problemas de localización de instalaciones se pueden clasificar con base a distintas características:

- De acuerdo con el número de nuevas instalaciones, se tienen dos alternativas de problema: *localización de una sola instalación* y problemas de *localización de múltiples instalaciones*.
- Respecto al espacio de solución, generalmente se considera:
 - Continuo:** Cuando la o las instalaciones pueden ubicarse en cualquier lugar dentro de una región bidimensional o tridimensional. Una variación es el *problema de localización en red*, donde una o más nuevas instalaciones se ubican en nodos o en arcos de la red.
 - Discreto:** Solo pueden localizarse en ubicaciones específicas.

Asimismo, se consideran *problemas de localización planar* y *3D*, cuando deben ubicarse de forma bidimensional o tridimensional respectivamente.

- Existen dos criterios que representan las funciones objetivo más comunes. La primera, consiste en ubicar una o más nuevas instalaciones tal que la suma ponderada de las distancias

entre pares sea minimizada (*problema de localización minisuma*). El otro criterio consiste en que la distancia máxima ponderada recorrida desde una nueva instalación hacia una existente sea minimizada (*problema de localización minimax*). De aquí se deriva el caso contrario, cuando se desea que la distancia mínima entre ella y una o más instalaciones sea maximizada, por ejemplo, al ubicar una prisión (*problema de localización maximin*), (Thompkins et al., 2010).

- Cuando el problema se plantea en función de la distancia, las cuatro medidas comúnmente utilizadas son las observadas en la Tabla 6.

Tabla 6

Tipos de distancias

Rectangular	Euclidiana o rectilínea	Chebyshev	Trayectoria de Flujo
Trayectorias que son ortogonales entre sí.	A lo largo de la trayectoria en línea recta entre dos puntos.	Es la mayor de las distancias horizontal y vertical recorridas	Las distancias se miden a lo largo de la trayectoria real recorrida entre dos puntos.
$ x - a + y - b $	$[(x - a)^2 + (y - b)^2]^{1/2}$	$Max(x - a ; y - b)$	

Nota. Adaptado de Thompkins et al. (2010)

2.4.4.2 Enfoques clásicos de localización: distancia y cobertura. Dentro de los problemas clásicos de localización de instalaciones se distinguen principalmente dos grandes enfoques: los modelos basados en distancias y los modelos de cobertura.

-Modelos basados en la distancia. Su objetivo general es minimizar una función de distancia entre los distintos puntos de demanda y las instalaciones.

Dentro de estos modelos, se encuentra el clásico problema de la mediana (p-mediana) minimiza la distancia total o promedio ponderada entre cada demanda y su centro asignado con el fin de seleccionar p instalaciones (Jiménez, 2018). Lo que es igual a intentar que, en promedio, la gente viaje lo menos posible para acceder al servicio.

Una variante es el problema del centro (p-centro), que también busca localizar p instalaciones, pero su perspectiva es minimizar la distancia máxima de cualquier persona que demande un servicio a la instalación más cercana. Se prioriza la equidad en términos de alcance, es decir, que nadie quede demasiado lejos (Bustos, et al., 2023)

Otro enfoque se da para el caso donde el interés del problema se restringe a localizar una instalación que debe atender un conjunto de puntos de demanda previamente definidos. El objetivo es determinar la posición más representativa para dicha instalación (Chase et al., 2000). Se destaca el método del centroide ponderado o centro de gravedad que tiene como objetivo minimizar la suma ponderada de las distancias cuadráticas entre la instalación y cada punto de demanda, donde los pesos reflejan la importancia relativa de cada localización.

-Modelos de cobertura. El principal supuesto es que una instalación atiende demandas dentro de una zona de cobertura, definida por un tiempo o distancia máxima. El objetivo general es maximizar la cobertura con un número fijo de instalaciones.

Su modelo clásico es el **problema de cobertura máxima** (MCLP), formulado por Church & ReVelle (1974), que a partir de p centros disponibles, busca cubrir el mayor número de demandantes.

Una variante ampliamente utilizada es el **problema de cobertura mínima**, que pretende ubicar el mínimo número de instalaciones tal que la demanda quede dentro del radio de cobertura (Toregas et al., 1971).

2.4.5 Cobertura en problemas de localización

La cobertura se define como la relación del servicio satisfactorio entre un punto de demanda y una instalación, considerando la capacidad que tiene el cliente para desplazarse desde el punto de demanda hasta la instalación dentro de un tiempo o distancia crítica. Por lo tanto, se

considera cubierto si la distancia que lo separa de la instalación es igual o menor a un valor preestablecido, denominado radio de cobertura (Fallah et al., 2009), Por ejemplo, Fadda et al. (2021) mencionan que el radio de cobertura se podría representar como la distancia máxima que un vehículo eléctrico puede recorrer o que un usuario está dispuesto a conducir para llegar a una instalación.

La importancia de garantizar cobertura radica en su enfoque de buscar satisfacer la mayor cantidad de población posible con recursos limitados y de equidad, buscando que la mayoría de los ciudadanos no se encuentren a una distancia excesiva de la instalación a localizar. Esta perspectiva es fundamental en la planeación de servicios públicos y de emergencia, como estaciones de bomberos, hospitales y centros médicos (Francis & White, 1974).

2.4.6 Localización en la logística humanitaria

Al llevar el problema de localización al ámbito de la logística humanitaria ante escenarios de desastre como los terremotos, se mantiene el objetivo general que consiste en seleccionar el lugar ideal para cierta instalación, pero la perspectiva desde la cual se aborda es diferente porque la decisión tiene un impacto directo en los tiempos de atención a víctimas y los costos. Se hablan de dos tipos de instalaciones según Daza-Moscoso et al. (2024):

- **Temporales:** Son aquellas que se abren o se cierran durante un periodo de tiempo, sus principales objetivos son minimizar la distancia de desplazamiento, demanda insatisfecha y costo. Este es el tipo de instalación a ubicar en este proyecto, centros médicos temporales.
- **Permanentes:** Su función es brindar recursos para el momento en que ocurra el desastre (almacenes, hospitales, etc.) que requieren una planificación en el largo plazo.

Por otro lado, se suelen utilizar distintas restricciones: *de capacidad* para limitar los recursos que puede tener una instalación, *de distancia* para limitar la distancia entre la instalación y las víctimas de la emergencia, *de demanda* que limitan el número de personas atendidas por instalación y *de asignación* que influye en dónde ubicar y cómo distribuir los recursos. También, existen condiciones de incertidumbre para establecer la demanda, condiciones geográficas que limitan las opciones donde se puede ubicar y condiciones en infraestructura como el bloqueo que afectan el transporte hacia los puntos de ubicación (Daza-Moscoso et al., 2024). Con base en lo mencionado, se evidencia que el problema de localizar instalaciones médicas temporales tiene una base sólida en la literatura especializada tradicional pero la perspectiva de modelado cambia al incluir los criterios descritos relacionados con la logística humanitaria.

2.4.7 Clusterización

La clusterización se define como la agrupación de elementos basada en la información que describe a los datos de los objetos y sus relaciones. El objetivo es que los integrantes de un mismo grupo compartan características comunes, es decir, que sean similares entre sí, pero distintos respecto a los pertenecientes a otros grupos. Entre más preciso sea el análisis de conglomerados, mayor es su similitud dentro de un mismo grupo (Tan et al., 2005). Según Santos Lima et al. (2014), la metodología de *clustering* en logística humanitaria posibilita el análisis de datos históricos de desastres con el fin de agrupar regiones que presentan patrones parecidos de ocurrencia y tipo de desastre, esto promueve la planificación diferenciada, la priorización de recursos y la estandarización de las respuestas logísticas; permitiendo una mayor eficiencia y agilidad en la fase de preparación y respuesta ante emergencias. Para el caso de este proyecto, el enfoque de *clustering* permitiría segmentar la población de la ciudad en cierto número de zonas

para establecer los puntos de demanda de las potenciales víctimas dentro de cada clúster ante el escenario de un evento sísmico.

2.4.7.1 Clasificación de métodos de análisis de clústeres. En la literatura se suelen distinguir dos enfoques clásicos y muy utilizados en la clusterización:

-Métodos Jerárquicos de Análisis Clúster. Su objetivo es crear estructuras de grupos anidados a partir de un conjunto de datos, ya sea mediante procedimientos que involucren agregación o división. Bajo el enfoque de agrupación, la idea es combinar los clústeres de forma progresiva para conformar grupos más grandes, mientras que el otro enfoque busca dividir un clúster para formar clases cada vez más específicas a partir de un conglomerado mayor (Villardón, 2007). En cualquiera de los casos, de acuerdo con Gallardo (2011), el proceso se detiene cuando se cumple alguna condición de parada:

- Se conforma un conglomerado único.
- Se logra el número k de grupos deseados.
- Se identifica a partir de un contraste de significancias que, continuar con nuevas agrupaciones no resulta estadísticamente eficiente por la pérdida de homogeneidad entre los grupos formados.

Además, Gallardo (2011) menciona que estos métodos se subdividen en:

- Métodos aglomerativos o ascendentes, cada dato se considera inicialmente como un clúster independiente y, a partir de esto se realizan uniones sucesivas hasta completar la clasificación del conjunto de datos.
- Métodos disociativos o descendentes, se parte de un único conglomerado que agrupa todas las observaciones y se aplican divisiones progresivas hasta obtener grupos de menor tamaño.

-Métodos de Partición. A diferencia de los métodos jerárquicos, estos requieren definir previamente el número de clústeres k , su objetivo es asignar iterativamente las observaciones en cada uno de los grupos hasta obtener la mejor partición posible, generalmente se busca minimizar la disimilitud interna del clúster y maximizar la separación entre clústeres (Popat & Emmanuel, 2014).

Dentro de esta clasificación, uno de los algoritmos más conocidos es **k-medias**, propuesto por MacQueen (1967), aquí se asigna cada dato al clúster cuyo centroide resulta más cercano, generalmente bajo una medida de distancia euclidiana, y se recalculan los centroides de forma iterativa hasta alcanzar un criterio de convergencia donde todos los puntos han sido asignados a algún clúster. Otro algoritmo de partición es el **k-medoides**, introducido por Kaufman & Rousseeuw (1987), reemplaza el centroide por el medoide, es decir, el objeto más representativo del clúster en términos de disimilitud promedio, incrementando así la robustez del método frente a la presencia de valores atípicos. Más allá de estos modelos base, dentro de la literatura se han propuesto nuevos métodos como las técnicas de clustering de densidad o los métodos de clustering borrosos.

2.4.7.2 Determinación del número de clústeres. Este es uno de los aspectos metodológicos más relevantes en la aplicación de algoritmos de clusterización, en especial cuando se emplean métodos de partición.

Con el fin de poder sustentar esta decisión es necesario recurrir al uso de índices de desempeño, que permitan valorar cada una de las particiones obtenidas y evaluar la calidad de los clústeres. Sin embargo, la literatura señala que existe una amplia cantidad de indicadores y que no existe un criterio universal para seleccionar el número de clústeres en todos los contextos de aplicación (Tomašev & Radovanović, 2016).

Wierzchoń & Kłopotek (2018), mencionan que varios de los métodos aplicados se pueden dividir en los siguientes grupos:

Visualización de datos. Se busca proyectar datos multidimensionales a espacios bi- o tridimensionales para inspeccionar su estructura de agrupamiento, empleando herramientas como análisis de componentes principales (PCA) y el escalamiento multidimensional (MDS), útiles para explorar separaciones entre grupos y detectar solapamientos.

Comparación de la cohesión dentro del conglomerado y la separación entre conglomerados. Para ello se utilizan medidas como la correlación punto-biserial, definida como la **correlación de Pearson** entre: (a) El vector de distancias entre pares de elementos. (b) Un vector indicador que toma valor 1 si el par pertenece al mismo clúster y 0 en caso contrario. También se emplea el **índice de Silueta** que evalúa para cada observación, la relación entre su disimilitud promedio respecto a los elementos de su propio clúster y la disimilitud promedio respecto al clúster alternativo más cercano.

Heurísticas simples. Además de reglas aproximadas, una de las heurísticas más difundidas es el método del codo, que identifica un punto de inflexión donde aumentar el número k de clústeres reduce la variabilidad intraclúster solo de forma marginal. Su fortaleza es la simplicidad; su debilidad es que el “codo” puede ser ambiguo en ciertos datos.

3. Selección de las herramientas de modelación

3.1 Planteamiento general para la selección

En este proyecto se estudia el problema de localizar centros médicos temporales ante eventos sísmicos a partir de un modelo multi-fase. El modelo se plantea como herramienta de

apoyo para tomar la decisión de donde localizar estas instalaciones, con el fin de garantizar el acceso y contribuir a una respuesta eficaz en contextos de emergencia.

Para abordar este problema en la ciudad de Bucaramanga, desde la literatura se ha evidenciado que, caracterizar una ciudad frente al riesgo sísmico implica integrar el análisis de variables multidimensionales, es decir, factores no solo espaciales, sino relacionados con la vulnerabilidad socioeconómica y estructural de la ciudad, con el fin de estimar daños probables o demanda esperada de víctimas (Ocola, 2005). Por esta razón, antes de desarrollar el modelo es fundamental seleccionar las herramientas apropiadas que permitan manejar esta integración de datos y satisfacer los objetivos del proyecto.

Para el análisis y la selección de las herramientas de modelación, se revisan los siguientes aspectos basados en las necesidades del problema y su desarrollo metodológico:

- Procesar distintos tipos de variables, datos con variabilidad y presencia de valores atípicos sin que su resultado se vea afectado significativamente.
- Garantizar que los resultados reflejen la lógica espacial de la ciudad, es decir, clústeres contiguos y geográficamente coherentes.
- Permitir un flujo de información entre las fases del modelo.
- Viabilidad de implementación e interpretación.

3.2 Herramientas de clusterización y enfoques de solución para la localización

Con base en los aspectos planteados para el análisis y la selección, se realiza un marco comparativo de las distintas herramientas identificadas para dar respuesta al problema de localización y evaluar la cobertura en ciudad.

3.2.1 Clusterización

Selección del algoritmo de clusterización. Para seleccionar aquella técnica de clusterización que mejor se adapte al contexto de este proyecto, en la Tabla 7 se presentan las ventajas y desventajas de los dos principales métodos identificados en la literatura y que se mostraron en el marco teórico.

Tabla 7

Comparación de métodos de clusterización.

Métodos	Ventajas	Desventajas
Jerárquicos Everitt et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> -Son una fuerte base en el análisis de clústeres, reflejando su amplio uso y aceptación. -Están ampliamente disponibles en los paquetes de software, lo que facilita su implementación. -Son fáciles de usar, permite accesibilidad para investigaciones con poca experiencia en clusterización. 	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere de un alto costo computacional para grandes conjuntos de datos -Las soluciones para grandes volúmenes de datos (preagrupamiento o muestreo) no están disponibles en los paquetes estándar, solo en software especializado. -La selección final de la partición no tiene un criterio universalmente claro, lo que dificulta interpretar los resultados. -Cuando se necesita una partición específica sin una jerarquía subyacente, estos no son los más adecuados.
De Partición Aggarwal & Reddy (2014)	<ul style="list-style-type: none"> -Permiten mejorar gradualmente la calidad del agrupamiento mediante un proceso de mejoramiento iterativo, -Son eficaces para detectar agrupaciones esféricas compactas. -Son ampliamente usados en distintos campos de aplicación porque son fáciles de implementar y utilizar. -Algoritmos como k-medias resultan computacionalmente eficientes, en comparación con métodos jerárquicos. -Existe una percepción no consensuada que producen una respuesta final de mayor calidad que los métodos jerárquicos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere especificar o estimar el número de conglomerados K. -No proporcionan una estructura jerárquica que facilite la exploración visual de los datos. -Algoritmos como el k-medias presentan un comportamiento no determinista, lo que puede generar resultados distintos en diferentes ejecuciones.

Con base en esta información, se seleccionan los *métodos de partición* para desarrollar el proceso de clusterización. Esto se basa en que las ventajas presentadas son relevantes para el desarrollo del modelo y se alinean con los objetivos de investigación. Su desventaja principal es que requiere determinar el número de k particiones, pero su selección se realizaría con base en el análisis de indicadores, como los mostrados en el marco teórico, que fundamenten la cantidad elegida de clústeres. Dentro de los métodos de partición existen dos algoritmos que son comúnmente utilizados, por lo que resulta importante compararlos y analizar cuál elegir.

A partir de Aggarwal & Reddy (2014), se construye Tabla 8 que presenta la comparación de los principales aspectos generales de estos algoritmos de clusterización.

Tabla 8

Comparación de los algoritmos k -medias y k -medoides.

Criterio	K-medias	K-medoides
Representación del clúster	El clúster se representa mediante un centroide , definido como el promedio de los puntos asignados al conglomerado, el cual no necesariamente corresponde a una observación real del conjunto de datos.	El clúster se representa mediante un medoide , definido como un punto real del conjunto de datos que actúa como representante del conglomerado.
Sensibilidad a valores atípicos	Mayor sensibilidad al ruido y a los valores atípicos debido al uso del promedio.	Menor sensibilidad al ruido y a los valores atípicos al emplear puntos reales como representantes.
Estrategia iterativa	Procedimiento iterativo que alterna la asignación de los puntos al centroide más cercano y la actualización de los centroides.	Procedimiento iterativo basado en la sustitución de puntos representativos para mejorar la calidad del agrupamiento
Costo computacional	Computacionalmente eficiente, adecuado para conjuntos de datos de gran tamaño.	Presenta un mayor costo computacional, lo que limita su uso directo en grandes volúmenes de datos.

Con base en la comparación realizada, se decide seleccionar como algoritmo de clusterización **K-medoides**, ya que representa cada conglomerado mediante observaciones reales del conjunto de datos, lo que reduce la sensibilidad a valores atípicos y permite obtener agrupamientos más estables.

Selección de la medida de disimilitud. Luego de definir la herramienta de clusterización a usar, es importante elegir la medida de distancia o disimilitud, ya que es un aspecto transversal al proceso de clusterización. Esta medida debe permitir que se comparen adecuadamente los puntos de demanda. En este proyecto, se considera que existe literatura donde se caracteriza la vulnerabilidad sísmica de una zona a partir del análisis de distintos tipos de variables. Se pueden integrar variables espaciales continuas (como las coordenadas geográficas), variables socioeconómicas o demográficas que mezclan datos cuantitativos y cualitativos (Olcina, 2022). Por ello, se decide seleccionar la **distancia de Gower** que es un tipo de medida que permite calcular el valor de similitud según el tipo de variable para luego transformarlo en una matriz de disimilitudes o de distancias (Gower, 1971).

3.2.2 Localización

Es importante analizar y comparar los distintos métodos de localización para identificar la herramienta que mejor se adapta al contexto del proyecto y la ciudad de Bucaramanga. En este sentido, tal como se expone en el marco teórico, los problemas clásicos de localización de instalaciones se abordan principalmente desde dos enfoques: los modelos basados en distancias y los modelos de cobertura.

También, se evidencia en la revisión de la literatura que existen múltiples modelos de localización de instalaciones aplicados a escenarios sísmicos que incorporan formulaciones

matemáticas de alta complejidad, incluyendo enfoques robustos, multiobjetivo, estocásticos y de programación lineal.

A continuación, se presenta el análisis de las herramientas existentes bajo estos tres enfoques. En la Tabla 9, se presenta el análisis de las ventajas y desventajas generales de aplicar los modelos basados en distancias mencionados en la sección 2.4.4.2 para localizar p instalaciones.

Tabla 9

Análisis de los modelos basados en la distancia para localizar p instalaciones.

Ventajas	Desventajas
<p>-El problema de p-mediana es muy estudiado en localización debido a su simplicidad y relevancia. Existen numerosos algoritmos exactos y heurísticos eficientes desarrollados para resolverlo, por ejemplo, <i>branch-and-bound</i>, búsqueda tabú, VNS, lo que ayuda a manejar su complejidad computacional en la práctica (Reese, 2006).</p> <p>-Su objetivo está altamente alineado con la logística humanitaria, minimizar el tiempo o la distancia de acceso es un objetivo clave para mejorar la respuesta, lo que puede traducirse en llegadas más rápidas de ayuda que salvan vidas (Balcik & Beamon, 2008).</p>	<p>-Estos modelos requieren de programación entera o heurísticas sofisticadas, ya que son problemas de alta complejidad (NP-hard) (Kariv & Hakimi, 1979).</p> <p>-En el modelo de p-mediana se puede dar el caso en que las zonas periféricas queden relativamente lejos, si eso reduce las distancias totales en áreas centrales.</p> <p>-El modelo p-centro, al tener un enfoque en el “peor de los casos”, se podría incrementar el recorrido total de la mayoría de personas con tal de reducir la máxima distancia (Nickel & Puerto, 2005).</p>

En el caso de una sola instalación, en el marco teórico se presenta el método del centroide ponderado. Su principal ventaja es que, a diferencia de los modelos como p -mediana o p -centro, este no requiere de procesos iterativos, aportando rapidez y bajo costo computacional. Además, la localización se realiza en un espacio continuo y es fácil de explicar a los tomadores de decisiones, lo que representa una ventaja frente a modelos más sofisticados. Su principal desventaja es que, a

diferencia de los modelos complejos, no se consideran capacidades de atención, restricciones de acceso y tampoco se evalúa de forma directa la cobertura.

De manera complementaria, y bajo el enfoque de cobertura descrito en el marco teórico, las ventajas y desventajas identificadas para estos modelos se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Análisis de los modelos de cobertura.

Ventajas	Desventajas
-Garantizan un nivel de equidad básico de acceso, ya que se busca garantizar que la mayor población quede dentro del rango establecido.	-La solución lleva a que la mayoría queden dentro de la zona de cobertura, pero no minimiza las distancias de quienes ya están cubiertos.
-Permiten integrar metas territoriales, por ejemplo, con el mínimo número de p instalaciones garantizar cierto nivel de cobertura.	-El modelo es sensible ante el parámetro definido de cobertura. Un radio grande puede “relajar” el modelo, mientras que un radio muy pequeño podría requerir tantas instalaciones que no es factible de implementar.

Por último, los enfoques complejos enmarcan las diferentes metodologías de modelado identificadas en el análisis de la literatura, donde se combinan múltiples objetivos, por ejemplo, minimizar distancia y maximizar equidad simultáneamente. Se incorpora la capacidad de las instalaciones, incertidumbre en demanda, planificación de recursos, entre otros aspectos metodológicos novedosos. Estos modelos suelen definir de manera explícita una función objetivo, un conjunto de restricciones y una representación directa de la demanda, con el fin de obtener la mejor solución posible. Sin embargo, estos no parten de una estructuración previa de la demanda mediante técnicas de clusterización, sino que abordan el problema de localización de forma directa. Además, dentro de la logística humanitaria, se presentan limitaciones a la hora de implementar modelos de optimización por no incorporar datos reales o la no viabilidad de los tiempos de solución (Rodríguez et al., 2023)

Selección de la herramienta de localización. Considerando el análisis realizado para cada uno de los modelos y métodos de localización presentados anteriormente, se selecciona el **centroide ponderado** porque permitiría determinar para cada clúster, de forma rápida e interpretable, el punto geográfico de equilibrio basado en la demanda potencial estimada y la clusterización de la ciudad. En cuanto a la desventaja de no evaluar directamente la cobertura, los esquemas de localización resultantes pueden ser evaluados posteriormente mediante un indicador, conforme al objetivo del proyecto.

3.3 Herramientas computacionales de soporte

Una vez definidas las herramientas necesarias para la construcción del modelo, resulta fundamental establecer la herramienta computacional que funcionará como entorno para su implementación y visualización. En este proyecto se seleccionan dos plataformas de código abierto ampliamente reconocidas dentro de la comunidad científica: **R** y **QGIS**.

Selección del entorno y lenguaje de programación. R es un lenguaje de programación y un entorno de trabajo orientado al análisis estadístico que, se caracteriza por (Lafaye de Micheaux, 2023):

- Gratuito y de código abierto, elimina restricciones asociadas al uso de licencias.
- Entorno reproducible, que facilita el seguimiento detallado del procesamiento de la información permitiendo comprender cada etapa del procedimiento y garantizando su validación por parte de terceros.
- Capacidad para generar gráficos de alta calidad, los cuales constituyen una herramienta clave para la interpretación de los métodos a desarrollar.

Con base en estas características se decide seleccionar esta herramienta ya que permite implementar componentes relacionados con la localización y el cálculo de la cobertura, además

contiene una amplia variedad de paquetes especializados para el análisis de clústeres, lo que lo hace viable implementar las herramientas seleccionadas anteriormente para la clusterización.

Selección Sistema de Información Geográfica (GIS). QGIS es un sistema de información libre y de código abierto que permite la visualización, edición y análisis de datos geoespaciales en formato vectorial o ráster, de manera que proporciona el manejo de sus funciones de capas provenientes de múltiples fuentes, entre las cuales se incluyen (QGIS.org, 2026):

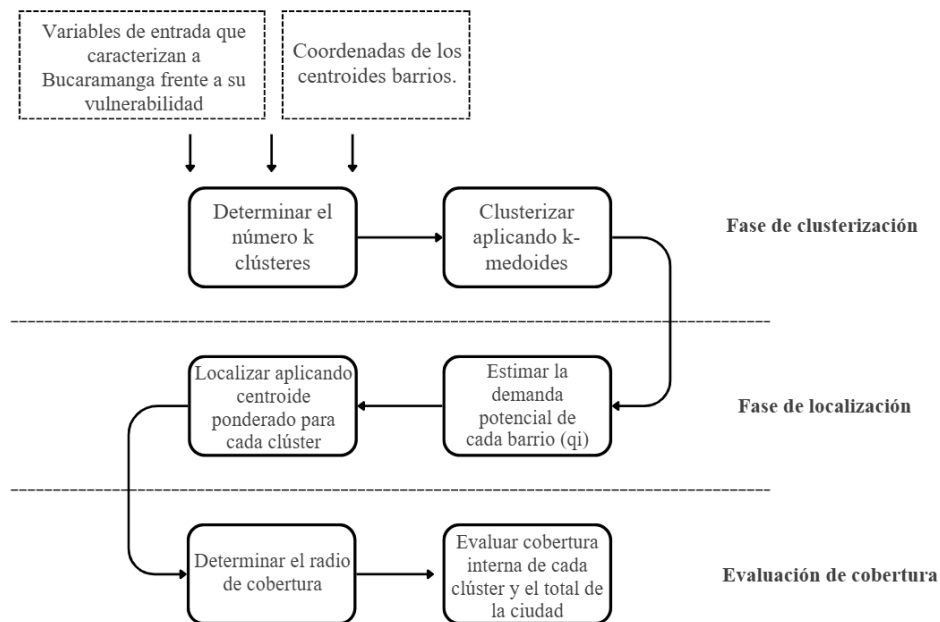
- Incorporar imágenes sin referencia espacial previa, como mapas escaneados o planos, que pueden ser integradas al sistema mediante georreferenciación basados en la asignación de puntos de control y sistemas de coordenadas.
- Ubicación en el espacio geográfico y uso de capas geográficas.
- Importación de datos tabulares externos, como archivos CSV, que pueden contener atributos o coordenadas espaciales generadas en otros entornos computacionales.

Dadas las características anteriormente descritas, se selecciona este software ya que incorpora herramientas de análisis geométrico que permiten calcular propiedades espaciales como áreas y centroides, esenciales para la delimitación de zonas, el análisis de coberturas y la representación espacial de resultados derivados de modelos de localización.

4. Desarrollo del modelo multi-fase

4.1 Definición general del modelo

Luego de seleccionar las herramientas para la construcción del modelo en sus fases de clusterización y localización, en la Figura 6 se define el flujo general del modelo:

Figura 6*Flujo general del modelo*

El flujo presentado en la Figura 6 se define a partir de las siguientes consideraciones:

- *Definición de la unidad de análisis.* Se toman como base los barrios urbanos de Bucaramanga, ya que son una estructura territorial concreta, de los cuales se encuentra información útil para caracterizar la vulnerabilidad ante eventos sísmicos de la ciudad.
- *Representación Espacial.* Cada barrio se representa mediante su centroide geográfico (x_i, y_i) como una aproximación puntual de su localización.
- *Capacidad de los Centros Médicos Temporales (CMT).* No se define una capacidad limitada, sino que un centro médico puede atender a un barrio si este se encuentra dentro del radio de cobertura. Por lo tanto, la capacidad del CMT debe estar diseñada para atender la demanda potencial que se le asigne.

4.2 Fase de clusterización

En esta primera fase, el modelo tiene como objetivo segmentar la población de los barrios en grupos que compartan características espaciales y presenten una caracterización similar frente a la vulnerabilidad sísmica.

4.2.1 Variables de entrada seleccionadas

En el desarrollo del marco teórico se identifica que estas variables son de naturaleza multidimensional frente al riesgo sísmico, integrando componentes estructurales, sociales y económicos. Por esta razón, se determinó la información disponible para seleccionar medidas que caractericen dichas dimensiones, considerando lo que presenta la literatura y las fuentes gubernamentales, referentes a la población en los barrios de Bucaramanga. En la Tabla 11 se presentan las variables seleccionadas.

Tabla 11

Resumen de las variables de entrada.

Variable de entrada	Dimensión	Descripción	Tipo de variable
Latitud del centroide (y_i) Longitud del centroide (x_i)	Espacial	Coordenadas geográficas del centroide del barrio, usadas para calcular distancias y asegurar coherencia geográfica en la conformación de clústeres.	Cuantitativa Continua (Espacial)
Población (P_i)	Demográfica	Total de habitantes del barrio, utilizada para diferenciar el potencial de demanda entre zonas.	Cuantitativa discreta
Estrato socioeconómico (E_i)	Socio-económica (económica-social)	Clasificación de viviendas por estratos 1 a 6 definida por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], s. f.), útil para caracterizar diferencias de vulnerabilidad socioeconómica.	Cualitativa Ordinal

Tabla 11. (Continuación)

Variable de entrada	Dimensión	Descripción	Tipo de variable
Índice de Pobreza Multidimensional (IPM_i)	Socio-económica (multi-dimensional)	Indicador del DANE basado en 5 dimensiones y 15 indicadores; un hogar es pobre si supera 33,3% (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2025). Permite identificar perfiles de privación similares entre barrios.	Cuantitativa Continua
Porcentaje de Daño [esperado en edificaciones] (D_i)	Estructural (Exposición física)	Daño medio esperado estimado mediante un factor de daño medio (MDF) del estudio de Rondón & Chio Cho (2005), usado para diferenciar zonas con mayor afectación física esperada.	Cuantitativa Continua

Luego de seleccionar las variables de entrada, se procede a realizar la recopilación de los datos disponibles para detallar cada variable a nivel de barrios.

Inicialmente se define el número de barrios que serán la unidad de análisis del modelo. Para ello se descarga el mapa de barrios de la ciudad, donde se identifican a nivel urbano 206 barrios. Una vez establecidos los barrios, se procede a determinar el centroide para cada uno a través del software QGIS. En el apéndice A se muestra a detalle el proceso realizado.

Para las variables de estrato e IPM se descargan los mapas disponibles en la web proporcionados por el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) y el DANE, respectivamente. Estos mapas se integran junto con la capa de barrios para asignar a cada uno el estrato y el valor de IPM más representativo. El procesamiento completo se presenta en el apéndice B donde se explica cómo se obtienen estos valores.

Por su parte, la asignación del porcentaje de daño esperado en las edificaciones se realiza con base en una adaptación del plano de la zonificación sísmica de la ciudad de Bucaramanga presentado en Maldonado Rondón & Chio Cho (2005) (revisar apéndice C).

Por último, el cálculo de la población se determina a partir de datos de los habitantes por barrio obtenidos de Datos Abiertos Colombia para 2021 y la estimación total de la ciudad para 2025 basada en el plan de desarrollo de Bucaramanga. A diferencia de las variables anteriores, la población no deriva de mapas y su proceso de estimación se presenta detalladamente en el apéndice D.

Toda la información recopilada para las variables a nivel de barrios se organiza detalladamente como se muestra en la Tabla 12, donde hay 10 de los 206 barrios caracterizados con las variables seleccionadas después de realizar los procedimientos anteriormente descritos y detallados en sus respectivos apéndices.

Tabla 12

Muestra de 10 barrios caracterizados con las variables seleccionadas.

Barrio	Población	X	Y	Estrato	IPM	Porcentaje de daño
1 de mayo	1120	-73,1420628	7,10257058	2	22	0,06
12 de octubre	49	-73,1362526	7,11905675	2	10	0,06
13 de junio	448	-73,1315382	7,15015564	2	50	0,25
20 de julio	464	-73,1180021	7,09552231	1	18,4	0,06
23 de junio	2240	-73,1363301	7,11789806	3	12,2	0,06
Africa	1340	-73,1195009	7,09477864	1	40,9	0,06
Alarcon	3686	-73,1229489	7,12595563	4	26,7	0,06
Albania	1948	-73,1059827	7,13065483	2	9,9	0,34
Alfonso lopez	9546	-73,1322412	7,11461715	3	24,4	0,06
Altos del cacique	902	-73,0951838	7,09944587	4	8,6	0,12

Nota. Se presentan las 10 primeras filas del apéndice E, donde se encuentran los 206 barrios.

4.2.2 Selección del número de clústeres

Definir el parámetro k clústeres es crítico porque determina el nivel de segmentación espacial sobre el cuál, posteriormente se van a localizar las instalaciones médicas temporales, por ello, se determina k evaluando la familia de particiones $K \in \{2, \dots, K_{max}\}$ y comparando su calidad mediante los criterios del codo y el índice de silueta mencionados en el marco teórico.

Disimilitud por atributos $D^{(A)}$. Dado que las variables de entrada son de naturaleza mixta (cuantitativas y ordinales), la matriz de disimilitudes se construye mediante el coeficiente de Gower (Gower, 1971). Esta medida de distancia no euclidiana permite combinar estas variables, a partir de la definición del valor de similitud S_{ijk} para cada tipo de dato:

Variables cuantitativas (IPM_i, P_i, D_i). Dado los x_n valores de cada variable cuantitativa k , se calcula:

$$s_{ijk} = 1 - \frac{|x_i - x_j|}{R_k} \quad (1)$$

- R_k : Rango de la variable k .

Variables ordinales (E_i). Se considera el ranking para ordenar las variables y luego se aplica la asignación de cada S_{ijk} , aplicando el procedimiento de variables cuantitativas anteriormente descrito.

Además, se define:

- $\delta_{ijk} = \begin{cases} 0, & \text{no se puede comparar } x_i \text{ y } x_j \text{ en una variable } k \text{ porque falta un valor} \\ 1, & \text{en caso contrario} \end{cases}$
- W_k : El peso asignado a cada variable [para este proyecto se asumen pesos iguales, entonces $W_k = 1$].
- v : Número total de distintos tipos de variables considerados

Por último, se calcula S_{ij} , que es la medida de similitud final entre el barrio i y el j .

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^v w_k \delta_{ijk} S_{ijk}}{\sum_{k=1}^v w_k \delta_{ijk}} \quad (2)$$

Debido a que el algoritmo de clusterización que se va a aplicar y mucho otros requieren como entrada el cálculo de una matriz de distancias o de disimilitud, al utilizar el coeficiente de Gower es necesario realizar la siguiente transformación:

$$d_{ij}^{(A)} = 1 - S_{ij} \quad (3)$$

Dado que la matriz de disimilitud no es euclidiana, es necesario realizar una transformación adicional para que esta matriz se pueda usar en métodos de clusterización y herramientas de análisis de clúster que funcionan mejor cuando asumen condiciones más cercanas a la euclidianidad. Bajo esta necesidad se decide implementar el método de Cailliez (1983) para encontrar una representación euclidiana.

Este método consiste en encontrar la menor constante positiva c^* , tal que la matriz de disimilitudes $d_{ij}^{(A,euc)}$ definidas por:

$$d_{ij}^{(A,euc)} = \begin{cases} 0, & \text{si } i = j \\ d_{ij}^{(A)} + c, & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

tenga una representación euclidiana en un espacio $c \geq c^*$

Matriz espacial $D^{(E)}$. A partir de las coordenadas geográficas correspondientes al centroide de cada barrio (x_i, y_i) y de forma paralela, el modelo construye una matriz de distancias espaciales para representar la proximidad geográfica. Dado que los datos de entradas son coordenadas, se trabaja en un sistema proyectado métrico (MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogotá – EPSG:3116) para obtener distancias en km. Luego, se calculan las distancias euclidianas que corresponden a la mínima ruta lineal entre los barrios i y j .

$$d_{ij}^{(E)} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (5)$$

Construcción de la matriz fusionada $D^{(F)}$. En este punto se tienen 2 matrices euclidianas. La primera conformada por las diferencias entre los barrios dada su caracterización por variables socioeconómicas, demográficas y estructurales de exposición física. Por su parte, la segunda matriz corresponde a las distancias entre barrios. Dado que se quiere clusterizar considerando esta información simultáneamente, se combinan estas matrices con el método expuesto por Melssen et al. (2006). Por lo tanto, se fusionan ambas matrices aplicando:

$$D^{(F)} = (1 - \alpha) * D^{(A,euc)} + \alpha * D^{(E)}, \quad \alpha \in [0,1] \quad (6)$$

Donde:

- α : parámetro de ponderación que controla la contribución relativa de cada componente. Para el proyecto, se define que ambos componentes tienen igual importancia por lo que $\alpha = 0,5$.

Al tener $D^{(F)}$ es importante verificar si esta es euclidiana y en caso de que no sea, se aplica nuevamente el método de Cailliez para obtener la matriz definitiva $D^{(F,euc)}$, que es la entrada usada para explorar y determinar el número k de clústeres y la posterior clusterización de la ciudad.

Selección de k clústeres. Se define como límite superior de evaluación $K_{\max} = 15$ para la exploración de particiones porque para la escala urbana del problema, k muy altos podrían generar clústeres demasiado pequeños que perderían su utilidad frente a la localización de CMT.

El primer criterio para revisar es el método del codo (WSS). Dado que la técnica de clusterización a aplicar opera sobre una matriz de disimilitudes, el análogo del WSS se define como el costo agregado intra-clúster con referencia al medoide:

$$W(k) = \sum_{c=1}^k \sum_{i \in C_c} D^{(F,euc)} * (i, m_c) \quad (7)$$

Donde m_c es el medoide del clúster y $D^{(F,euc)}$ la matriz euclidiana fusionada.

Asimismo, se analiza el índice de Silueta que se calcula según Rousseeuw (1987) de la siguiente forma:

- Para una observación i asignada al clúster A , definir $a(i)$ como la disimilitud promedio con los elementos de A .
- Para cada clúster C diferente de A , se calcula $d(i, C)$ definida como disimilitud promedio con los elementos de cada uno de los clústeres diferentes de A .
- Se define $b(i)$ como el mínimo de todos los valores $d(i, C)$ calculados.
- Se obtiene $s(i)$ de la siguiente forma:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (8)$$

- Por último, se calcula el índice global como el promedio de los valores de $s(i)$:

$$\bar{s}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s(i) \quad (9)$$

Luego de calcular los valores de estos indicadores y analizar sus gráficas correspondientes, se toma la decisión del número k de clústeres.

4.2.3 Clusterización de la ciudad

Tomando como entrada el número de k clústeres, se determina la partición de los barrios de Bucaramanga mediante el método de k -medoides, que a nivel computacional se realiza a través del algoritmo PAM (*Partitioning Around Medoids*). El objetivo con base en $D^{(F, euc)}$ la matriz euclidiana fusionada, es asignar cada barrio de la ciudad a un clúster específico.

Formulación del modelo k -medoides. Partiendo de un valor k previamente definido y una matriz de disimilitudes fusionada $D^{(F, euc)}$, con base en la formulación presentada por Kaufman y Rousseeuw (1987) se tiene:

-Parámetros:

- $I = \{1, \dots, n\}$: conjunto de barrios. Para este proyecto $n = 206$.
- k : número de clústeres (medoides) a seleccionar.
- $d_{ij}^{(F,euc)}$: disimilitud entre barrios i y j , extraídos de la matriz de distancias $D^{(F,euc)}$.

Donde: $d_{ii}^{(F,euc)} = 0$ [diagonal principal de ceros] y $d_{ij}^{(F,euc)} = d_{ji}^{(F,euc)}$ para $i \neq j$
[matriz simétrica].

-Variables de decisión:

- $y_j \in \{0,1\}$: 1 si el barrio j es seleccionado como medoide. En caso contrario, 0.
- $x_{ij} \in \{0,1\}$: 1 si el barrio i se asigna al clúster cuyo medoide es el barrio j . En caso contrario, 0.

-Función objetivo:

Minimizar la disimilitud total intra-clúster (suma de distancias al medoide asignado):

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} d_{ij}^{(F,euc)} x_{ij} \quad (10)$$

-Restricciones:

(1) Asignación única de cada barrio, cada barrio i se asigna exactamente a un medoide:

$$\sum_{j \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (11)$$

(2) Un barrio i solo puede asignarse a un barrio j si j fue seleccionado como medoide:

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in I \quad (12)$$

(3) Selección de exactamente k barrios como medoides, donde k es el número de clústeres:

$$\sum_{j \in I} y_j = k \quad (13)$$

(4) Consistencia del medoide (si j es medoide, se asigna a sí mismo):

$$x_{jj} = y_j \quad \forall j \in I \quad (14)$$

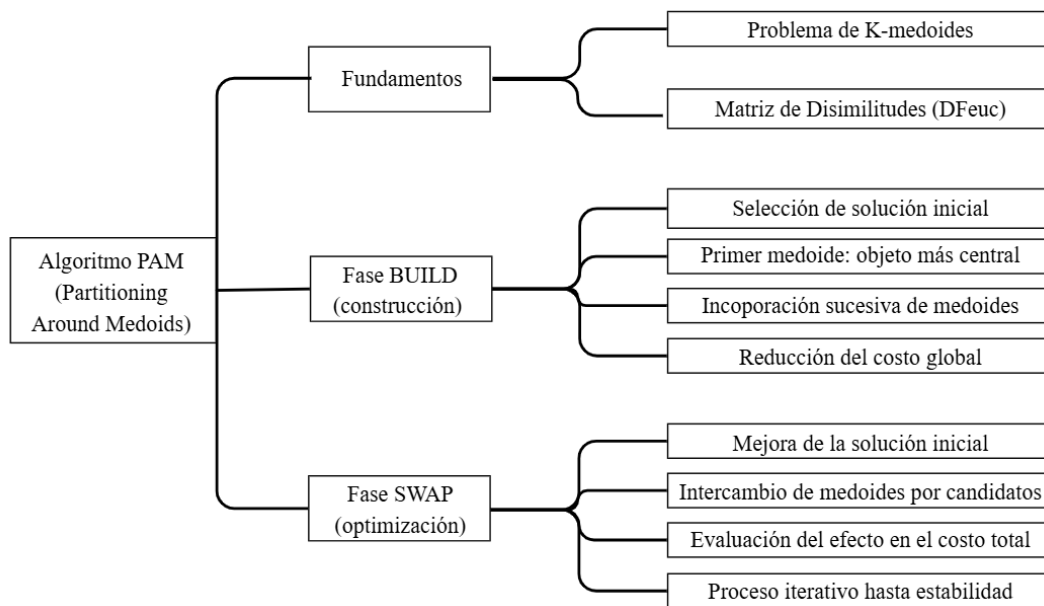
(5) Dominio:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad y_j \in \{0, 1\} \quad (15)$$

Clusterización mediante el algoritmo PAM. Corresponde a la herramienta clásica para determinar los k-medoides y la asignación de barrios, minimizando la función objetivo formulada anteriormente (Aggarwal & Reddy, 2014). Al finalizar, este algoritmo converge en una solución estable (óptimo local). En la Figura 7 se presenta la descripción general del algoritmo PAM presentado por Kaufman y Rousseeuw (1987).

Figura 7

Descripción general del algoritmo PAM



Nota. Adaptado de Kaufman y Rousseeuw (1987).

Caracterización de los clústeres obtenidos. Después de implementar el algoritmo se genera la asignación de cada barrio i a un clúster $c(i)$. A partir de esta salida, se adapta un enfoque descriptivo para generar un resumen estadístico por clúster y sintetizar un perfil comparativo con

las variables (IPM_i , P_i , D_i y E_i), que facilite su interpretación. Por ello, para el valor de k particiones que se analice y sea:

- $I = \{1, \dots, n\}$: conjunto de barrios. Para este proyecto $n=206$.
- $C_c \subseteq I$: conjunto de barrios asignados al clúster c .
- $c \in \{1, \dots, k\}$.
- $i \in I$.

Se calculan las siguientes medidas para la tabla resumen:

-Tamaño del clúster (cantidad de barrios).

$$n_c = |C_c| \quad (16)$$

-Población total del clúster.

$$P_c^{tot} = \sum_{i \in C_c} P_i \quad (17)$$

-Promedio de IPM.

$$\overline{IPM}_c = \frac{1}{|C_c|} \sum_{i \in C_c} IPM_i \quad (18)$$

-Promedio del porcentaje de daño.

$$\overline{D}_c = \frac{1}{|C_c|} \sum_{i \in C_c} D_i \quad (19)$$

-Moda del estrato socioeconómico (E_c^{moda}) como medida representativa de esta variable para el clúster, donde se permite empates cuando aplique.

4.3 Fase de localización

En la segunda fase del modelo, la partición territorial obtenida en la clusterización (k clústeres) se utiliza para definir la demanda a atender y ubicar un centro médico temporal (CMT) representativo por clúster. Para localizar se necesita: (a) La asignación barrio-clúster (b) El

centroide respectivo de cada barrio de Bucaramanga y (c) La estimación de la demanda potencial por barrio.

4.3.1 Estimación de la demanda potencial

Con el fin de aproximar la carga de atención esperada para los CMT a localizar ante un escenario sísmico, el modelo estima para cada barrio $i \in I$ (conjunto de los 206 barrios) una demanda potencial q_i (personas), a partir de su población (P_i) y un factor de afectación W_i que depende de las variables IPM_i , D_i y E_i . El procedimiento se estructura en tres pasos:

(1) Construcción de componentes normalizados de vulnerabilidad. Se define P_i la población del barrio i , E_i su estrato, IPM_i su índice de pobreza multidimensional y D_i el porcentaje de daño esperado en edificaciones. Primero se normaliza las variables en escalas $[0,1]$ de la siguiente forma:

- **Componente por estrato (inverso).** Como estratos bajos se asocian a mayor vulnerabilidad, se invierte la escala:

$$V_{E_i} = \frac{6 - E_i}{5} \quad (20)$$

- **Componente por IPM (min–max).** Se establecen los valores de (IPM_{\min} , IPM_{\max}), de acuerdo con los valores de este componente para cada barrio. Luego, se calcula:

$$V_{IPM_i} = \frac{IPM_i - IPM_{\min}}{IPM_{\max} - IPM_{\min}} \quad (21)$$

- **Componente por daño esperado (min–max).** Se definen los límites para D_i con base en los datos de entrada (D_{\min} , D_{\max}) y se establece para cada barrio:

$$V_{D_i} = \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (22)$$

(2) Definición en un índice compuesto. Bajo la ponderación igualitaria de las tres dimensiones, se define $V_i \in [0,1]$ que representa la vulnerabilidad relativa del barrio ante un escenario sísmico considerado. Se define así:

$$V_i = \frac{V_{E,i} + V_{IPM,i} + V_{D,i}}{3} \quad (23)$$

(3) Calibración del factor W_i y conversión a demanda entera. Para traducir V_i en una proporción de población potencialmente demandante, es necesario definir dos parámetros con base en la literatura y la revisión de eventos sísmicos históricos en Colombia:

- W_{\min} : proporción mínima esperada de población que demandaría atención médica.
- W_{\max} : proporción máxima esperada.

Luego, V_i se reescala a (W_{\min}, W_{\max}) de la siguiente forma:

$$W_i = W_{\min} + (W_{\max} - W_{\min})V_i \quad (24)$$

-Determinación de (W_{\max}, W_{\min}) . A partir del análisis realizado en la literatura, se identifican cinco documentos que validaron sus modelos con base en escenarios sísmicos reales que en el pasado habían afectado a una población específica. Con base en la estimación de heridos y el tamaño de la población afectada, se calcula la proporción entre los heridos y la población total afectada, arrojando un W_i promedio de 4,45 % y un W_{\min} de 1,1%.

Además, se revisan los registros de terremotos en Colombia, desde 1900 a la fecha, que aparece en la base de datos EM-DAT (2025). De estos datos se obtienen 22 eventos que reportan el número de heridos, donde 18 presentan menos de 300 lesionados y de los 4 restantes, se destaca el sismo de Armenia en 1999 que, con una población estimada de 278.236 y 8.563 heridos tras el evento, presenta una proporción del 3,08%. El procedimiento detallado y los datos obtenidos tanto de la literatura como de la base de datos EM-DAT se muestran en el apéndice F.

Por lo tanto, con el fin de estimar la demanda tras un evento plausible sin subestimar o ser muy conservadores, en este proyecto, se define:

- $W_{\min} = 0,5\%$.
- $W_{\max} = 5\%$. Entonces:

$$W_i = 0,005 + 0,045 V_i \quad (25)$$

Luego de establecer el W_i , se calcula la demanda potencial para cada barrio i y se convierte a valor entero (personas) aproximando q_i al entero superior:

$$q_i = [P_i \cdot W_i] \quad (26)$$

De esta forma, q_i representa el número de personas potencialmente demandantes del servicio de un CMT en el barrio i , que posteriormente se utilizará como ponderador para desarrollar el centroide ponderado y evaluar cobertura.

4.3.2 Localización de los centros médicos temporales

Con la demanda potencial q_i definida por barrio, las coordenadas (x_i, y_i) de sus centroides y la asignación $c(i)$ proveniente de la clusterización, el modelo ubica un CMT por clúster usando un centroide ponderado por demanda, de modo que la localización refleje simultáneamente la distribución espacial de los barrios y la intensidad relativa de la demanda dentro del clúster. Por esta razón, se formula como un problema de localización continua con costo proporcional al cuadrado de la distancia euclidiana, donde la demanda potencial de cada barrio actúa como factor de ponderación.

Bajo este enfoque, se pretende concentrar la atención médica en puntos que minimicen el desplazamiento agregado de la población afectada, penalizando de forma más severa las distancias largas. Formalmente, para un clúster k compuesto por m_k barrios, se busca minimizar la siguiente función objetivo:

$$\text{Min } f(x_k, y_k) = \sum_{i \in k} q_i [(x_k - a_i)^2 + (y_k - b_i)^2] \quad (27)$$

donde (a_i, b_i) corresponden a las coordenadas del centroide geográfico del barrio i .

Este problema admite una solución directa, conocida en la literatura como centroide ponderado, en el que las coordenadas del CMT para el clúster k se obtienen como el promedio ponderado por la demanda potencial de las coordenadas de los barrios que lo conforman:

$$x_k = \frac{\sum_{i \in k} q_i a_i}{\sum_{i \in k} q_i}, y_k = \frac{\sum_{i \in k} q_i b_i}{\sum_{i \in k} q_i} \quad (28)$$

De esta forma, los barrios con mayor demanda potencial ejercen una mayor influencia sobre la localización final del CMT, para que el centro se sitúe más cercana de zonas con mayor carga esperada de atención médica. Las coordenadas resultantes definen la localización del CMT para cada clúster y constituyen la base de evaluación de cobertura para los esquemas de localización, considerando radios de atención según las características del clúster.

4.4 Evaluación de la cobertura

Como última parte del modelo se evalúa la cobertura correspondiente al esquema completo de localización, es decir, se mide el nivel alcanzado bajo un escenario de segmentación espacial y localización de sus respectivos CMT.

Así como se especifica en el marco teórico, la perspectiva general consiste en revisar que fracción de la demanda potencial se encuentra dentro de un radio máximo de atención. En el contexto de este proyecto, no se considera un radio uniforme, sino uno diferenciado para cada clúster en función de las características socioeconómicas y estructurales promedio que lo describen.

4.4.1 *Definición del radio de cobertura*

Para cada clúster c , se establece un radio de cobertura R_c que representa la distancia máxima que una persona podría recorrer para acceder a atención médica dentro de un tiempo de respuesta aceptable. Este radio se calcula a partir de tres componentes:

- Tiempo máximo de respuesta T_{rta} (en minutos).
- Velocidad nominal de desplazamiento V_{nom} (en km/h).
- Factor de ajuste que refleja vulnerabilidad frente a posibles afectaciones en las vías que reducen la velocidad de desplazamiento V_c .

Selección de T_{rta} . Pons & Markovchick (2002) indican que cada vez más se usa el criterio de respuesta de una ambulancia dentro de 8 min para responder ante una emergencia. Sin embargo, alrededor del mundo se reportan valores diferentes como: Chicago (10 minutos), Seattle (6 minutos) y Ámsterdam (15 minutos), (Aguiar, 2022). Por parte de la ciudad de Bucaramanga, dentro del Informe de Gestión 2021 del Cuerpo Oficial de Bomberos (2021) se fija como objetivo atender incendios, rescates y materiales peligrosos en 9 minutos. Considerando esta información, se fija para este proyecto:

- $T_{rta} = 10$ minutos.

Selección de V_{nom} . Para determinar la velocidad promedio de desplazamiento entre los puntos de demanda y los CMT, se considera el supuesto de velocidad presentado en un modelo de rehabilitación vial post-terremoto en Taiwán, que define 20 km/h como velocidad media de los equipos de respuesta en calles afectadas (Feng & Wang, 2003). En cuanto a la movilidad en Bucaramanga, se presenta un estudio técnico de 2017 donde se identifican velocidades inferiores a 15 km/h entre las carreras 9 y 19 y las calles 22 y 45 (Dirección de Tránsito de Bucaramanga,

2017). Además, alrededor de las zonas cercanas a los puntos residenciales, clínicas y hospitales se debe mantener una velocidad máxima de 30 km/h. Bajo este contexto, se fija:

- $V_{nom} = 20$ km/h.

Definición del factor V_c . Se construye únicamente a partir del estrato socioeconómico representativo y del porcentaje medio de daño esperado en edificaciones, excluyendo el IPM de esta etapa específica del modelo. Esta decisión se establece porque su relación directa con la afectación de la infraestructura vial y la movilidad post-sismo es menor, ya que principalmente caracteriza condiciones de pobreza y privación social (DANE, 2025)

Con base en esto, se formula V_c :

Sea C_c el conjunto de barrios pertenecientes al clúster c . A partir de las medidas resumen del clúster, se define:

- E_c^{moda} : moda del estrato socioeconómico del clúster c .
- \bar{D}_c : porcentaje medio de daño esperado en edificaciones del clúster c .

Ambas variables se normalizan en el intervalo $[0,1]$ de la siguiente forma:

$$V_{E_c} = \frac{6 - E_c^{mod}}{5}, V_{D_c} = \frac{\bar{D}_c - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (29)$$

donde D_{min} y D_{max} corresponden a los valores mínimo y máximo del porcentaje de daño esperado observados en el conjunto total de barrios.

A partir de estas variables normalizadas, el índice de vulnerabilidad promedio del clúster se define como:

$$V_c = \frac{V_{E_c} + V_{D_c}}{2}, V_c \in [0,1] \quad (30)$$

Después de obtener los componentes de: T_{rta} , V_{nom} y V_c . El radio de cobertura se define como:

$$R_c = V_{f,c} \cdot \frac{T_{rta}}{60} \quad (31)$$

donde $V_{f,c}$ corresponde a la velocidad efectiva de desplazamiento del clúster c , calculada como:

$$V_{f,c} = V_{nom} \cdot (1 - V_c) \quad (32)$$

Bajo este enfoque, los clústeres con mayor vulnerabilidad presentan una menor velocidad efectiva y, por tanto, un radio de cobertura más reducido, reflejando condiciones de movilidad adversas tras un evento sísmico.

4.4.2 *Criterio de cobertura Barrio-CMT*

Después de definir los radios de cobertura por clúster R_c y las coordenadas del CMT correspondiente, se evalúa para cada barrio i si su demanda potencial es cubierta o no. Para ello, se calcula la distancia euclidiana d_{ic} entre el centroide del barrio i y el CMT del clúster al que pertenece, empleando un sistema de referencia métrico (MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogotá – EPSG:3116).

Se considera que el barrio i está cubierto si se cumple:

$$d_{ic} \leq R_c \quad (33)$$

Este criterio binario permite clasificar cada barrio como cubierto o no cubierto, y constituye la base para la agregación de resultados a nivel de clúster y de ciudad.

4.4.3 *Medición de la cobertura*

A partir de la clasificación Barrio–CMT, se calculan los siguientes indicadores para cada escenario de clusterización k :

- Demanda total del clúster. Suma de q_i para todos los barrios del clúster $[\sum_{i \in C_c} q_i]$.
- Demanda cubierta del clúster. Suma de q_i correspondiente únicamente a los barrios cubiertos $[\sum_{(i \in C_c, d_{ic} \leq R_c)} q_i]$.

- Proporción de cobertura del clúster:

$$Cobertura_c = \frac{\sum_{(i \in C_c, d_{ic} \leq R_c)} q_i}{\sum_{i \in C_c} q_i} \quad (34)$$

De manera análoga, se calcula la cobertura total de la ciudad como la razón entre la demanda total cubierta de esos barrios en cada clúster y la demanda potencial agregada de los 206 barrios.

$$Cobertura_{Ciudad} = \frac{\sum_{c=1}^k \sum_{(i \in C_c, d_{ic} \leq R_c)} q_i}{\sum_{i \in I} q_i} \quad (35)$$

El código de programación que implementa el modelo propuesto se presenta en el **Apéndice G**, donde se documenta el script desarrollado en el lenguaje R. Este se encuentra estructurado para la ejecución y análisis de múltiples escenarios, definidos por diferentes valores del número de clústeres k , a partir de los cuales se generan esquemas de localización para evaluar su respectiva cobertura.

5. Validación y evaluación de esquemas de localización

5.1 Validación del modelo desarrollado

La validación del modelo se orienta a verificar que la estructura multi-fase produce resultados coherentes respecto al problema planteado, localizando centros médicos temporales que representan un nivel de cobertura para su respectivo clúster. En este sentido, el modelo debe clusterizar zonas cercanas (espacialmente y con base en las variables de entrada), localizar un CMT por clúster y evaluar la cobertura. Para ello, se deben tener en cuenta las características de los barrios que lo conforman, con el fin de reflejar correctamente qué población es atendida y cuál no en el modelo.

5.1.1 Validación de la coherencia en la fase de clusterización

Para revisar si el modelo arroja las salidas esperadas y verificar su lógica interna, se selecciona un valor exploratorio de $k = 7$. Al correr este parámetro se observa que:

Todos los barrios fueron asignados a un clúster, ya que en la Tabla 13 se evidencia que la columna “cantidad de barrio por clúster”, suma en total 206, lo que corresponde a la totalidad de barrios ingresados. También, se identifica que existe heterogeneidad en las variables entre clústeres, por ejemplo, el clúster 3 es el más vulnerable frente al IPM medio, estrato y daño esperado en comparación con los otros 6, pero es el que menos población tiene. Este análisis de perfiles permite identificar este tipo de condiciones antes de realizar la localización, representando una herramienta practica para caracterizar los barrios agrupados de forma general.

Tabla 13

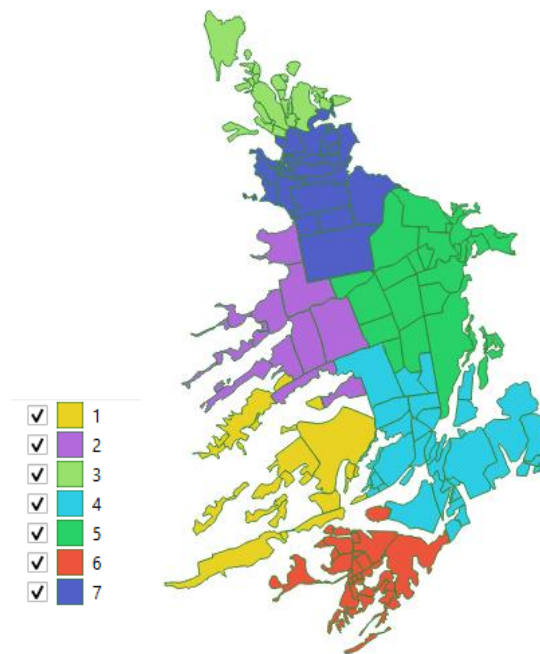
Resumen del perfil de clúster para $k=7$

Clúster	Cantidad de Barrios	Población total	IPM	Porcentaje de daño medio	Estrato
1	23	101154	18.8	0.0439	3
2	21	64138	20.6	0.0557	3
3	29	52147	33.1	0.224	2
4	41	99938	15.2	0.0678	4
5	29	129449	12.8	0.165	4
6	36	83699	15.4	0.025	3
7	27	82849	29.5	0.184	2

Para evidenciar la coherencia espacial del modelo frente al proceso de clusterización, en la Figura 8 se muestra la asignación de barrios a cada clúster. Se observa que los clústeres son geográficamente consistentes, agrupando barrios que son contiguos sin generar islas o barrios aislados. Esto confirma que se respeta la estructura espacial y que la matriz de distancias, que combina atributos y aspectos espaciales, representa adecuadamente la información ingresada.

Figura 8

Coherencia espacial del modelo para k -clúster=7

**5.1.2 Validación de la localización de los centros médicos temporales**

Validar la localización, es comprobar que las ubicaciones de los centros médicos temporales respondan efectivamente a la distribución espacial, definida en la fase previa, y que el modelo establezca correctamente las coordenadas del CMT que atenderá la demanda potencial del clúster. Esto implica que la información entre fases y la estimación de demanda se debe procesar e integrar de forma correcta.

La Tabla 14 presenta la salida final del modelo en la fase de localización, correspondiente a las coordenadas de los 7 CMT, ya que se continúa con $k = 7$ para ilustrar el flujo de información entre fases. Se observa que, aunque el clúster 3 es el que tiene menor población total, no necesariamente presenta la menor demanda potencial. Esto se debe a que la estimación realizada incorpora correctamente la vulnerabilidad frente al evento sísmico, a través de las variables ingresadas al modelo.

Tabla 14

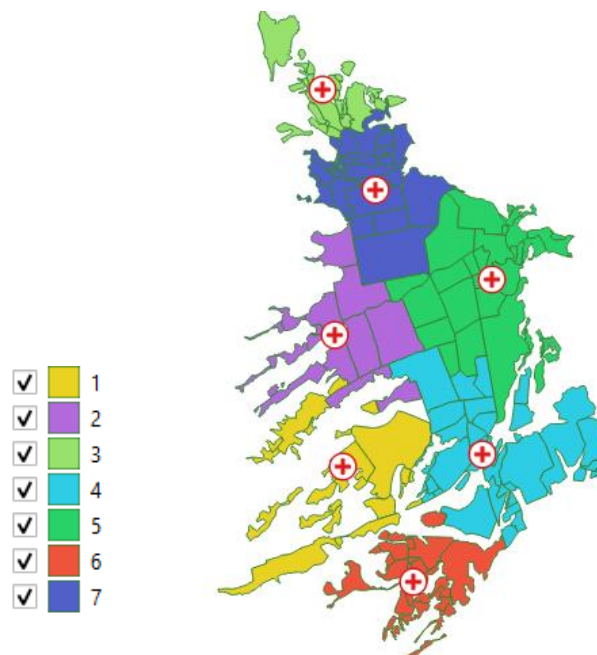
Salida final del modelo en la fase de localización para k -clúster=7

Clúster	Total demanda	Longitud del centroide	Latitud del centroide	Lugar de referencia
1	1725	-73,132	7,099	Cerca del Seminario Nuestra Señora de la Consolata
2	1275	-73,133	7,119	Por la Calle 31, San Francisco de Asís
3	1724	-73,135	7,155	Cerca de la Institución Educativa Maiporé
4	1586	-73,112	7,101	Cra 28A, Colegio Gabriela Mistral
5	2339	-73,110	7,127	Parque de las Américas
6	1334	-73,122	7,082	Calle 106, Colegio Cuna de Eminencias
7	2092	-73,127	7,140	Calle 6, Colegio Adventista Libertad Norte

La validación visual de los centroides en cada clúster y su representación conjunta se muestra en la Figura 9. Allí, cada clúster se identifica con el número asignado en la fase de clusterización y cada punto corresponde al CMT del clúster respectivo, según las coordenadas reportadas en la Tabla 14.

Figura 9

Esquema de localización para la ciudad de Bucaramanga para k -clúster=7



Con base en los dos resultados anteriores, se confirma la consistencia de los resultados presentados en la Tabla 14, ya que las coordenadas corresponden a un espacio continuo disponible dentro del límite urbano de la ciudad, garantizando viabilidad para su operación.

5.1.3 Validación del modelo para representar y evaluar cobertura

La validación de cobertura se enfoca en verificar que los radios de atención asignados a cada clúster reflejen las condiciones diferenciales de vulnerabilidad y movilidad post-sismo, y que el criterio de cobertura barrio-CMT se aplique de forma consistente. Para ello, se elige $k = 2$, ya que al existir solo dos clústeres se disponen menos CMT en la ciudad y, por tanto, se espera una menor cobertura efectiva. Además, este escenario tiende a generar particiones más contrastantes, por lo que el modelo debería evidenciar diferencias marcadas en los radios, en especial un radio significativamente menor en el clúster más vulnerable.

En la Tabla 15 se muestra el resultado para $k = 2$, donde se evidencia con mayor claridad cómo el modelo considera las diferencias internas en la atención de un CMT ante un escenario post-sismo, según la caracterización de cada clúster. Se observa que el radio de cobertura entre clústeres varía significativamente, siendo un 47,34 % menor en el clúster más vulnerable. Este comportamiento confirma que el modelo representa la cobertura de la instalación localizada de forma dinámica, validando que, a mayor vulnerabilidad, menor velocidad efectiva y, por ende, la cobertura de la instalación dentro del clúster vulnerable es menor. La visualización de estos radios en el mapa alrededor de cada CMT se presenta más adelante en la Figura 16, donde se evalúan los esquemas de localización, incluyendo el esquema $k = 2$.

En la Figura 10, se muestra una situación de caso frontera identificado desde QGIS para la evaluación de cobertura en el clúster 1. Ante esta situación, se contrasta el criterio de decisión del

modelo y se revisa si la decisión de barrio cubierto o no cubierto coincide con lo que se presenta en la figura.

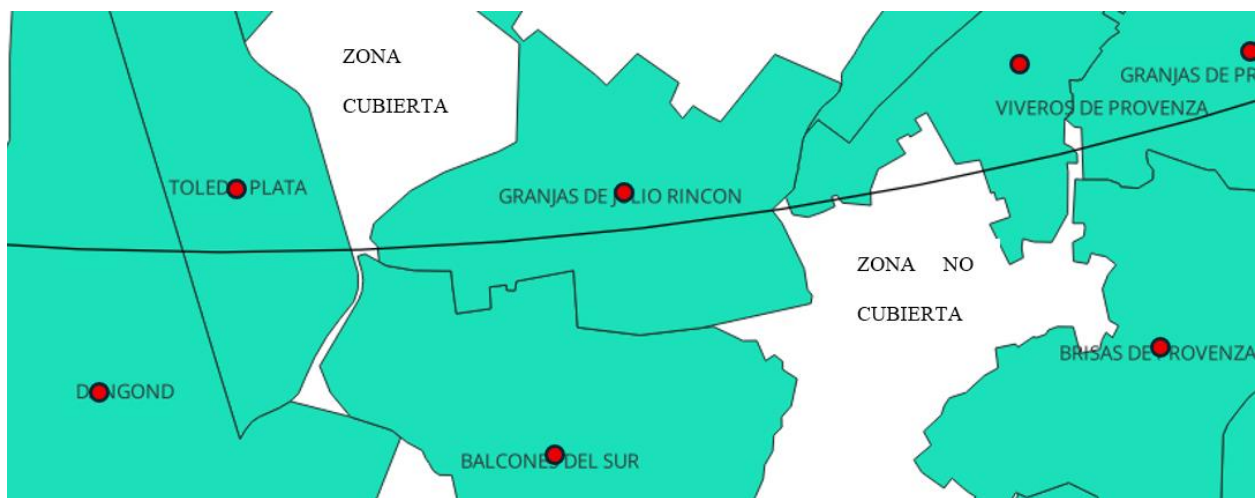
Tabla 15

Estimación del radio de cobertura para k -clúster=2.

Clúster	Tiempo de respuesta	Velocidad nominal (km/h)	Estrato	Porcentaje de Daño	Vi	Velocidad final (km/h)	Radio (m)
1	10	20	3	0,0517	0.349	13,007	2167,968
2	10	20	2	0,1848	0.657	6,847	1141,230

Figura 10

Caso frontera para la evaluación de cobertura en clúster 1.



En la Tabla 16 se observa la trazabilidad en la toma de decisión sobre si un barrio está cubierto o no. Además, se identifica que, para las siete observaciones cercanas a la frontera, el modelo determina correctamente que los barrios Dangond, Balcones del Lago y Brisas de Provenza se encuentran fuera del radio de cobertura. Esto reafirma la capacidad del modelo para identificar con precisión estas zonas, gracias a que se integran paquetes para proyectar del sistema de coordenadas hacia uno métrico y calcular las distancias.

Tabla 16

Evaluación de cobertura en el modelo para los barrios del caso frontera.

Barrio	Clúster	Distancia (m)	Radio (m)	Cubierto
Balcón del Lago	1	3140,05732	2167,96875	FALSE
Brisas de Provenza	1	2297,239	2167,96875	FALSE
Dangond	1	2255,0306	2167,96875	FALSE
Granjas de Julio Rincon	1	2146,2994	2167,96875	TRUE
Granjas de Provenza	1	2037,92211	2167,96875	TRUE
Toledo plata	1	2127,92436	2167,96875	TRUE
Viveros de Provenza	1	2108,53775	2167,96875	TRUE

5.2 Evaluación de esquemas de localización

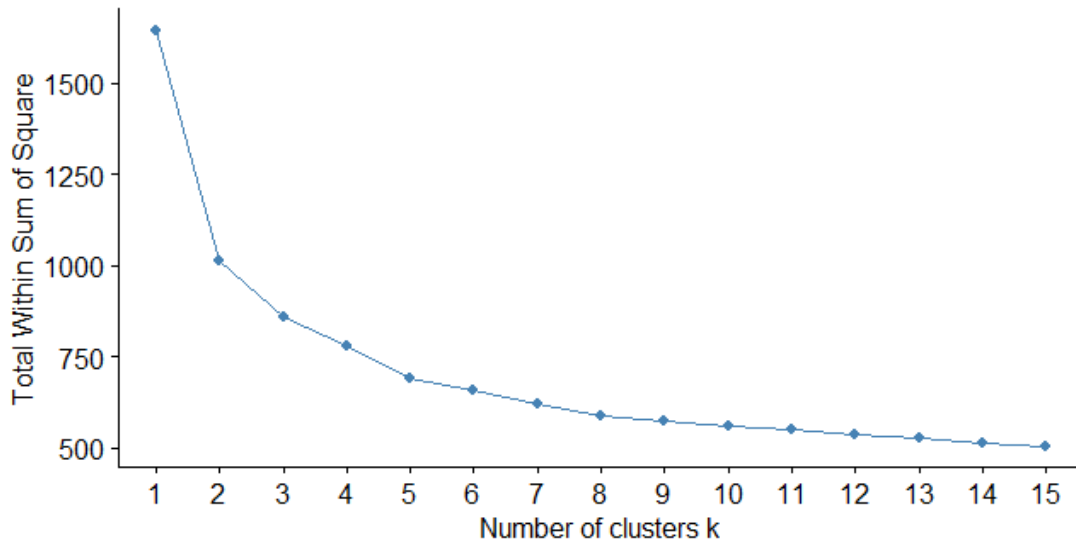
Con el fin de analizar el impacto que tiene el nivel de segmentación de la ciudad sobre la cobertura del sistema y la atención de las zonas (clústeres) más vulnerables, se procede a evaluar distintos esquemas de localización. Estos esquemas se definen a partir del número de clústeres k , determinado mediante el análisis del índice de silueta y el método del codo, eligiendo las tres particiones mejor posicionadas según estos criterios. Cada segmentación se interpreta como un esquema alternativo de localización, al cual se le evalúa la cobertura sobre la ciudad.

5.2.1 Definición de los esquemas de localización

Se fundamenta con base en el desarrollo de la primera parte de la fase de clusterización, donde a partir de la matriz fusionada que combina el componente espacial y de caracterización de la ciudad frente a la vulnerabilidad sísmica, se obtienen los gráficos de WSS, que presenta la evolución de la suma de cuadrados intra-clúster y el del índice de silueta que indica cohesión intra-clúster, siendo más consistente cuando su valor es más cercano a 1.

Figura 11

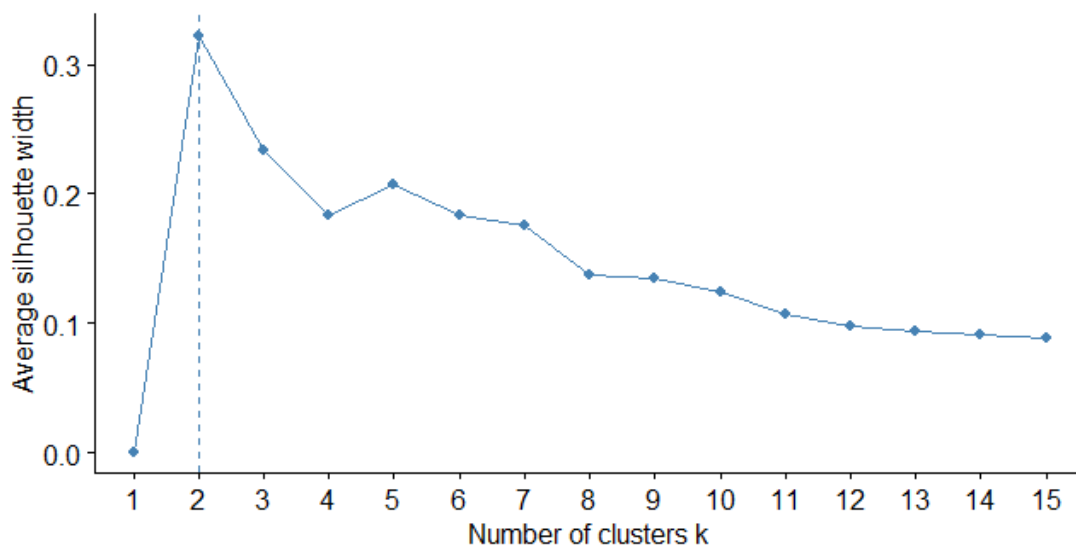
Elbow (WSS)- PAM sobre matriz fusionada.



En el Figura 11, se evidencia una reducción pronunciada de WSS para valores pequeños de k , seguido de una disminución en menor medida entre $k = 3$ y $k = 5$. Este comportamiento indica que, a partir de estos valores, las mejoras marginales se reducen significativamente.

Figura 12

Silhouette- PAM sobre matriz fusionada



Por su parte, la Figura 12 muestra que el valor máximo se alcanza en $k = 2$, indicando una diferenciación clara entre los conglomerados. En valores crecientes de k , el índice de silueta presenta una tendencia decreciente, aunque se identifica en $k = 3$ y $k = 5$, valores cercanos de silueta que son relativamente altos. Con base en esto, se seleccionan los 3 valores de k :

- Esquema E1: $k = 2$, presenta el mejor desempeño según el índice de silueta y representa un esquema altamente agregado.
- Esquema E2: $k = 3$, ofrece un compromiso entre calidad de agrupamiento y un esquema de segmentación intermedia.
- Esquema E3: $k = 5$, incrementa el nivel de segmentación espacial y mantiene valores aceptables en ambos indicadores.

5.2.2 *Caracterización territorial de los esquemas*

En primer lugar, la Figura 13 presenta los perfiles normalizados de los clústeres asociados a cada esquema, contruidos a partir de las variables de entrada que caracterizan cada zona frente a su vulnerabilidad ante la ocurrencia de un evento sísmico. Estos perfiles permiten analizar las diferencias relativas entre clústeres y evaluar la capacidad de cada esquema para capturar heterogeneidades relevantes en términos de vulnerabilidad.

A partir de ello, en la Figura 14 se muestra la distribución espacial de los clústeres para los esquemas con $k = 2$, $k = 3$ y $k = 5$, lo que permite observar cómo varía el nivel de agregación del territorio urbano a medida que aumenta el número de clústeres y cómo se reconfiguran las unidades territoriales resultantes.

Figura 13

Perfil normalizado clúster k=2, k=3, k=5.

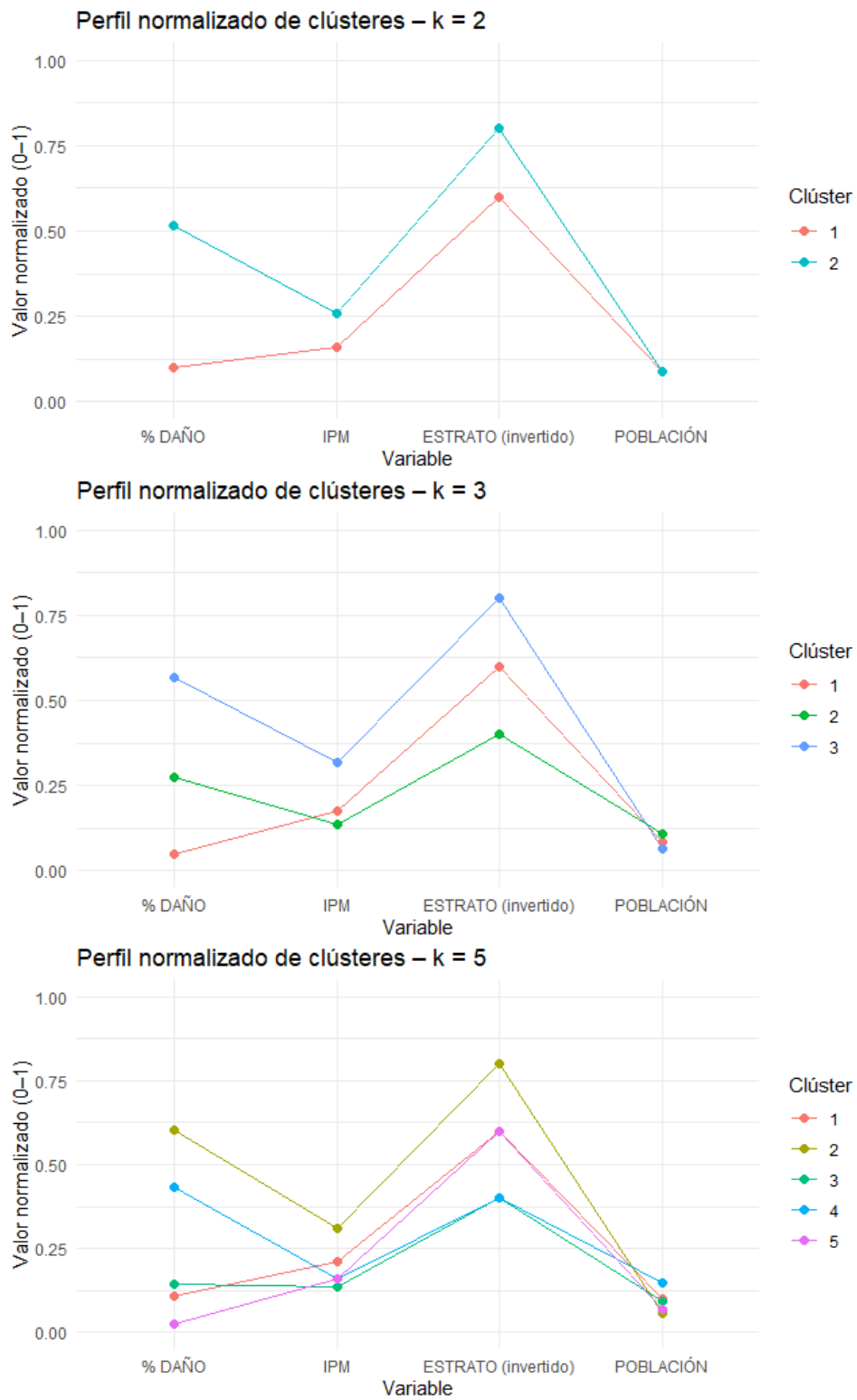
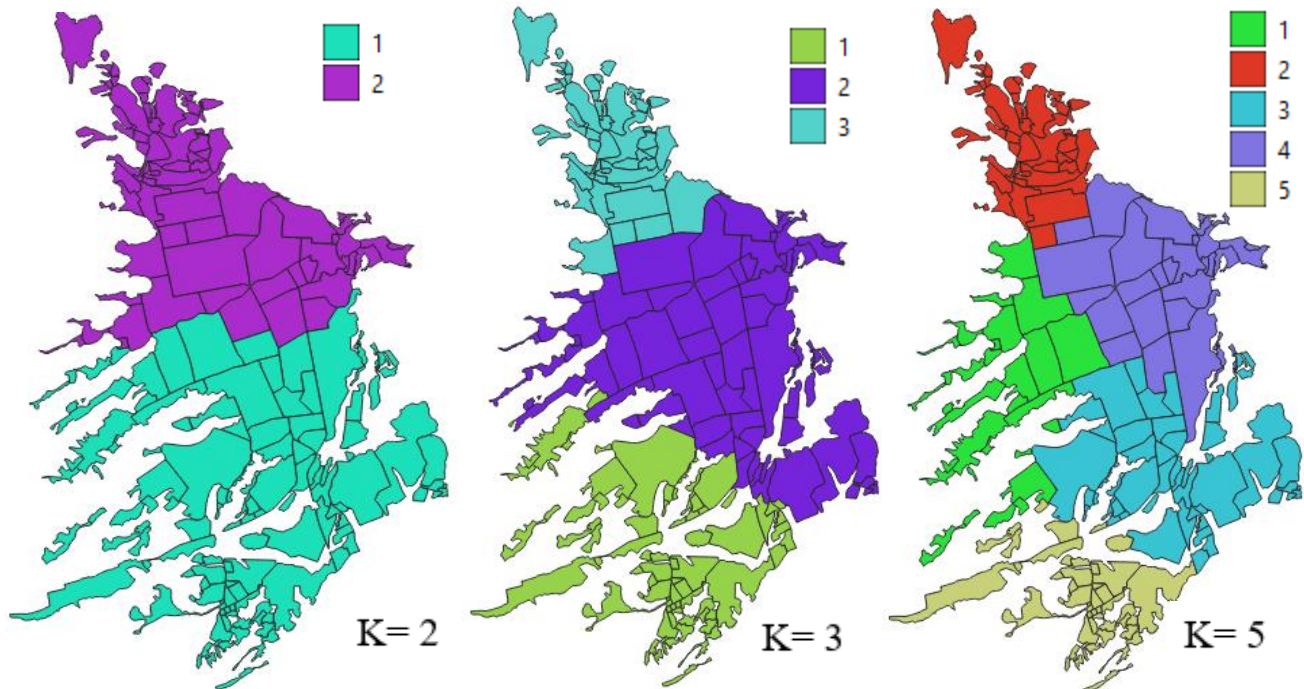


Figura 14

Distribución espacial de clústeres con $k=2$, $k=3$ y $k=5$



Esquema con $k = 2$. De la distribución espacial del esquema, se observa que la mayor cantidad de barrios se concentre en el clúster 1, con 120 barrios, frente a 86 asignados al clúster 2. Esta caracterización se complementa con la Tabla 17, que resume el perfil de vulnerabilidad de cada clúster a partir de las variables consideradas en el análisis.. Se evidencia que el clúster 2 es el más crítico del esquema, al presentar valores superiores en las variables asociadas a la vulnerabilidad, a excepción de la población total. El clúster 1 es el que concentra la mayor cantidad de habitantes, lo que implica que una fracción significativa de la población total se encuentra en un clúster con condiciones relativamente menos desfavorables.

Además, debido al carácter altamente agregado de la segmentación, este esquema integra dentro de un mismo clúster barrios con diferencias internas relevantes en términos de condiciones socioeconómicas y de daño esperado. Por esta razón, este esquema limita la capacidad del modelo

para distinguir subzonas críticas al interior del clúster más vulnerable, reduciendo el nivel de detalle con el que se representan las heterogeneidades territoriales.

Tabla 17

Resumen del perfil clústeres esquema 1.

Clúster	Cantidad barrios	Población Total	IPM media	Porcentaje de Daño medio	Moda de estrato
1	120	360957	16,163	0,0518	3
2	86	252417	25,919	0,1849	2

Esquema con $k = 3$. Al incrementar el nivel de segmentación a 3 zonas, el clúster identificado como más vulnerable en el esquema 1, se redefine y adquiere una mayor delimitación. En este segundo esquema, los valores más elevados de las variables asociadas a la vulnerabilidad, como se evidencia en la Tabla 18, se presentan en el clúster 3, consolidándose como la zona más crítica del sistema.

Este clúster presenta una menor población total respecto al esquema anterior, lo que sugiere una identificación más precisa de los sectores críticos y la reducción de la heterogeneidad interna observada en esquemas más agregados. También, se observa que el porcentaje de daño medio del clúster crítico aumenta respecto al esquema con $k = 2$, reafirmando lo que se esperaba con respecto a la delimitación más compacta.

En términos de distribución territorial, el clúster crítico agrupa un menor número de barrios, mientras que los otros dos clústeres presentan una cantidad de barrios similar entre sí. La mayor proporción de la población se concentra en los clústeres menos críticos y este esquema se concentra en una unidad espacial más homogénea, lo que mejora la capacidad del modelo para focalizar la atención médica para mejorar la cobertura.

Tabla 18*Resumen del perfil clústeres esquema 2.*

Clúster	Cantidad barrios	Población Total	IPM media	Porcentaje de Daño medio	Moda de estrato
1	75	219088	17,717	0,0352	3
2	74	272266	13,622	0,1074	4
3	57	122020	32,137	0,2021	2

Esquema con $k = 5$. Para el último esquema, la evolución del clúster vulnerable se manifiesta a través de una fragmentación adicional de las zonas críticas, notando un aumento en la granularidad de la segmentación territorial. En este caso, el clúster 2 se identifica como el más vulnerable y a diferencia de los esquemas más agregados, la vulnerabilidad deja de concentrarse en una única gran región, por lo que pasa a distribuirse en clústeres más pequeños y homogéneos, permitiendo una representación más detallada del territorio urbano.

Tabla 19*Resumen del perfil clústeres esquema 3.*

Clúster	Cantidad barrios	Población Total	IPM media	Porcentaje de Daño medio	Moda de estrato
1	32	106664	21,397	0,0541	3
2	52	103855	31,296	0,2135	2
3	48	147429	13,688	0,0660	4
4	31	154848	16,042	0,1590	4
5	43	100578	16,330	0,0274	3

En términos de distribución poblacional, los perfiles de clústeres evidencian una asignación más equilibrada de la población. Se identifica que los dos clústeres más poblados presentan condiciones de vulnerabilidad menos crítica, pero el clúster 4 destaca por su mayor densidad

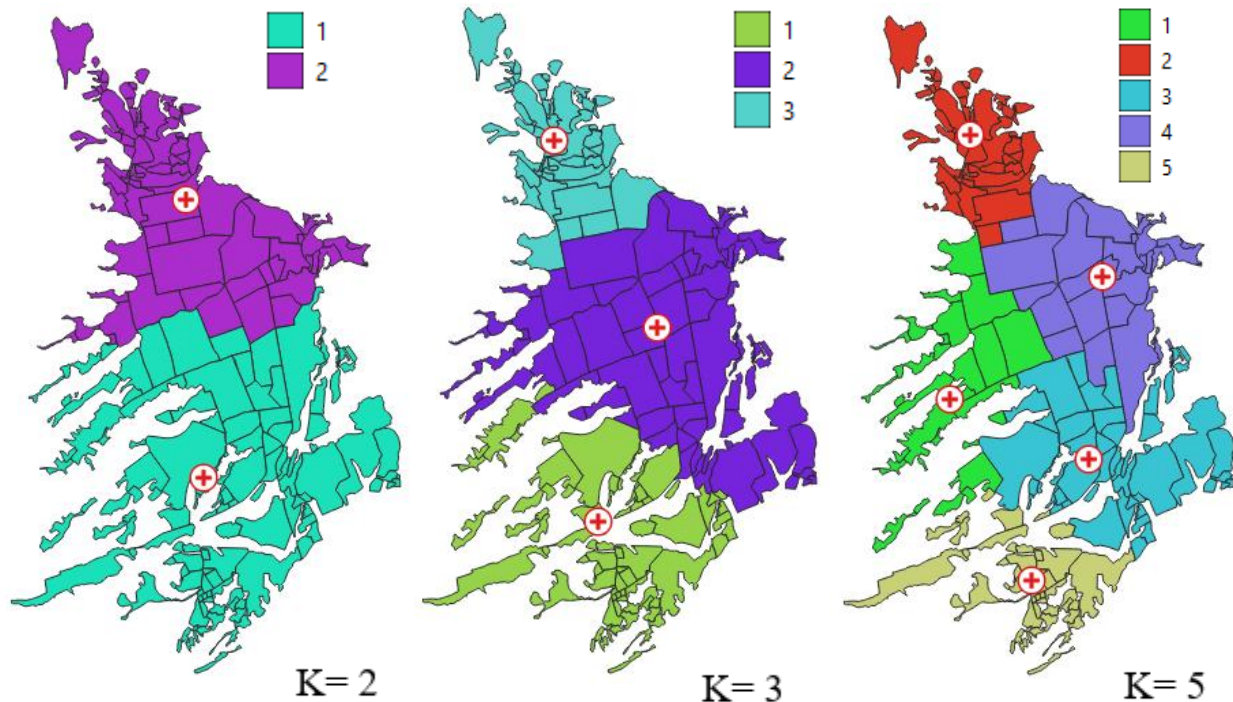
poblacional. Además, este mismo clúster presenta el segundo mayor porcentaje de daño medio del esquema, esto se evidencia en la Tabla 19, convirtiéndose así en una unidad territorial relevante desde el punto de vista de la exposición estructural.

5.2.3 Configuración espacial los centros médicos temporales (CMT)

La configuración espacial del sistema de atención resultante para cada esquema de localización se presenta en la Figura 15 donde se comparan las ubicaciones obtenidas de los CMT para los esquemas con $k = 2$, $k = 3$ y $k = 5$. En cada caso, los clústeres se muestran como unidades territoriales de referencia y los CMT se representan como puntos centrales de atención asociados a la demanda potencial estimada.

Figura 15

Configuración espacial del sistema de atención para cada esquema.



Asimismo, se presentan la Tabla 20 como resumen de las coordenadas geográficas de cada centro y la demanda total asignada por clúster, permitiendo una lectura cuantitativa de los resultados espaciales observados.

Tabla 20

Coordenadas de los CMT localizados en cada esquema propuesto.

Esquema	Clúster	Total- demanda	Longitud del centroide	Latitud del centroide	Punto/ubicación de Referencia
<i>k</i> = 2	1	5885	-73,122	7,099	Ubicado junto a la cancha Los Canelos, frente al Colegio Pilar, sede B.
	2	6190	-73,125	7,14	Frente al edificio Comuneros Real, cerca de la portería de la Calle 25 de la UIS.
<i>k</i> = 3	1	3705	-73,125	7,093	Sobre la calle 68
	2	4702	-73,117	7,12	Museo de arte moderno de Bucaramanga
	3	3668	-73,131	7,147	Frente Metrolínea portal del norte
<i>k</i> = 5	1	2167	-73,135	7,111	Club deportivo la 45
	2	3217	-73,132	7,149	Iglesia de Jesús el Cristo, visión y Santidad
	3	2197	-73,115	7,102	Sobre la carrera 23, cerca del Colegio La Salle.
	4	2863	-73,113	7,129	Universidad Corporativa de Colombia
	5	1631	-73,123	7,084	Colegio Adventista Libertad

Los resultados muestran que en el esquema con $k = 2$, el sistema de atención se organiza a través de 2 CMT que dan lugar a una configuración espacial altamente concentrada, con cargas elevadas de demanda potencial, lo que simplifica la operación, pero obliga a cubrir áreas extensas. Por lo tanto, se espera una limitación de cobertura asociada al radio efectivo de atención, que se evaluará en la siguiente sección. Al incrementar el nivel de segmentación a $k = 3$, la configuración espacial del sistema se distribuye de manera más equilibrada, separando funcionalmente el clúster

más vulnerable y reduciendo las áreas de influencia de cada centro, lo que mejora la correspondencia entre ubicación y demanda potencial. Por último, con $k = 5$, la configuración espacial del sistema de atención evidencia una red claramente más dispersa y granular. Esto permite que las demandas sean más acotadas para cada CMT y exista mayor proximidad entre cada centro y los clústeres, lo que sugiere un aumento esperado en cobertura, especialmente en el clúster 2, identificado como más vulnerable en este esquema.

Con base en la comparación realizada, se observa que el aumento en el número de clústeres conduce a una transición progresiva desde configuraciones de atención centralizadas hacia redes más distribuidas. Mientras que los esquemas más agregados concentran la atención en pocos centros con alta carga de demanda, los esquemas más desagregados redistribuyen dicha carga entre un mayor número de centros, reduciendo la demanda individual atendida dentro de cada clúster.

5.2.4 Desempeño en términos de cobertura

Una vez determinado el centroide geográfico correspondiente a cada centro médico temporal (CMT) dentro de su respectivo clúster, resulta fundamental evaluar si dicha ubicación garantiza efectivamente la atención de la demanda potencial asignada. La existencia de un único CMT por clúster no implica, por sí misma, que toda la población del clúster pueda ser atendida, dado que la cobertura del sistema está condicionada por restricciones espaciales y de accesibilidad posteriores al evento sísmico.

Para este fin, se define un radio de cobertura dinámico para cada clúster, y se evalúa la cobertura de acuerdo con el proceso determinado en el desarrollo de modelo. En la Tabla 21 se presentan estos resultados. Además, se presenta en la Figura 16, la representación visual y espacial del esquema de localización completo, donde se ilustran los CMT, centroides de cada barrio y los radios de cobertura asociados a cada clúster que delimitan la zona de cobertura.

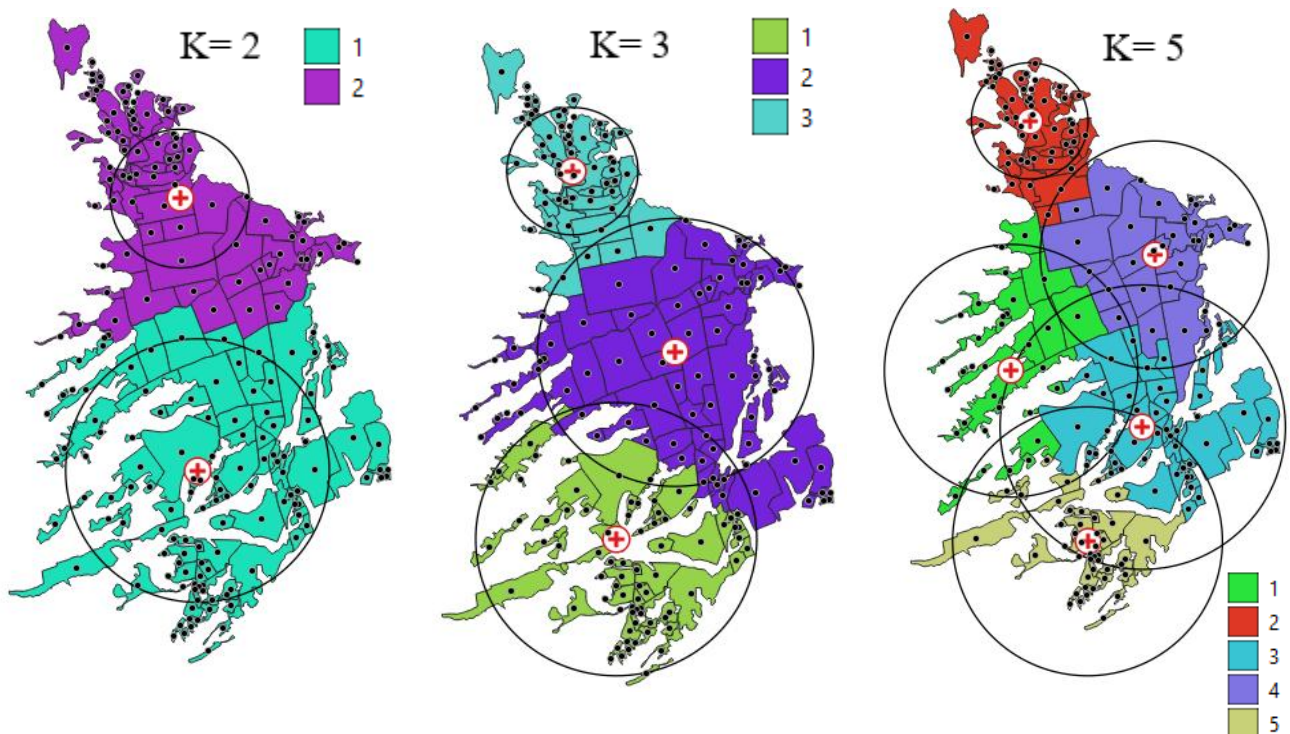
Tabla 21

Evaluación de cobertura para los esquemas de localización.

Esquema	Clúster	Radio (m)	Cobertura
$k = 2$	1	2167,96875	73,917%
	2	1141,23062	31,373%
Total-ciudad			52,108%
$k = 3$	1	2254,166667	98,30%
	2	2211,289414	84,18%
	3	1051,535088	61,86%
Total-ciudad			81,73%
$k = 5$	1	2155,924479	85,048%
	2	992,3878205	65,216%
	3	2426,866319	100%
	4	1942,540323	100%
	5	2294,573643	100%
Total-ciudad			88,050%

Figura 16

Evaluación de la cobertura de los esquemas de localización de CMT ante sismos en la ciudad de Bucaramanga.



A partir del análisis integral del esquema de localización y su evaluación en términos de cobertura, se observa que el esquema con $k = 2$ permite cubrir una fracción relevante de la demanda total de la ciudad. No obstante, los resultados evidencian que un número significativo de barrios queda fuera del radio de atención de los centros médicos temporales, particularmente en el clúster 2, previamente identificado como el más vulnerable. Este comportamiento se explica por el alto nivel de agregación territorial del esquema, en el cual cada clúster agrupa una gran cantidad de barrios y demanda potencial. Bajo estas condiciones, y considerando las restricciones de accesibilidad derivadas de la vulnerabilidad y de las afectaciones viales posteriores a un evento sísmico, no es posible alcanzar niveles elevados de cobertura en todo el territorio urbano.

Al incrementar el nivel de segmentación a $k = 3$, se observa una mejora en el desempeño del sistema en términos de cobertura relativa. La redistribución espacial del sistema de atención reduce la presencia de áreas de influencia excesivamente extensas y permite una mayor proximidad entre los centros médicos temporales y la demanda potencial. En este esquema, el clúster 3, identificado como la zona más vulnerable, presenta un aumento significativo en su proporción de demanda cubierta respecto al esquema con $k = 2$, evidenciado en la Tabla 21, reflejando una mejor adaptación del sistema a las condiciones locales del territorio. A nivel ciudad, la cobertura global también mejora como resultado de la incorporación de un centro adicional, lo que refuerza la capacidad del sistema para atender zonas críticas.

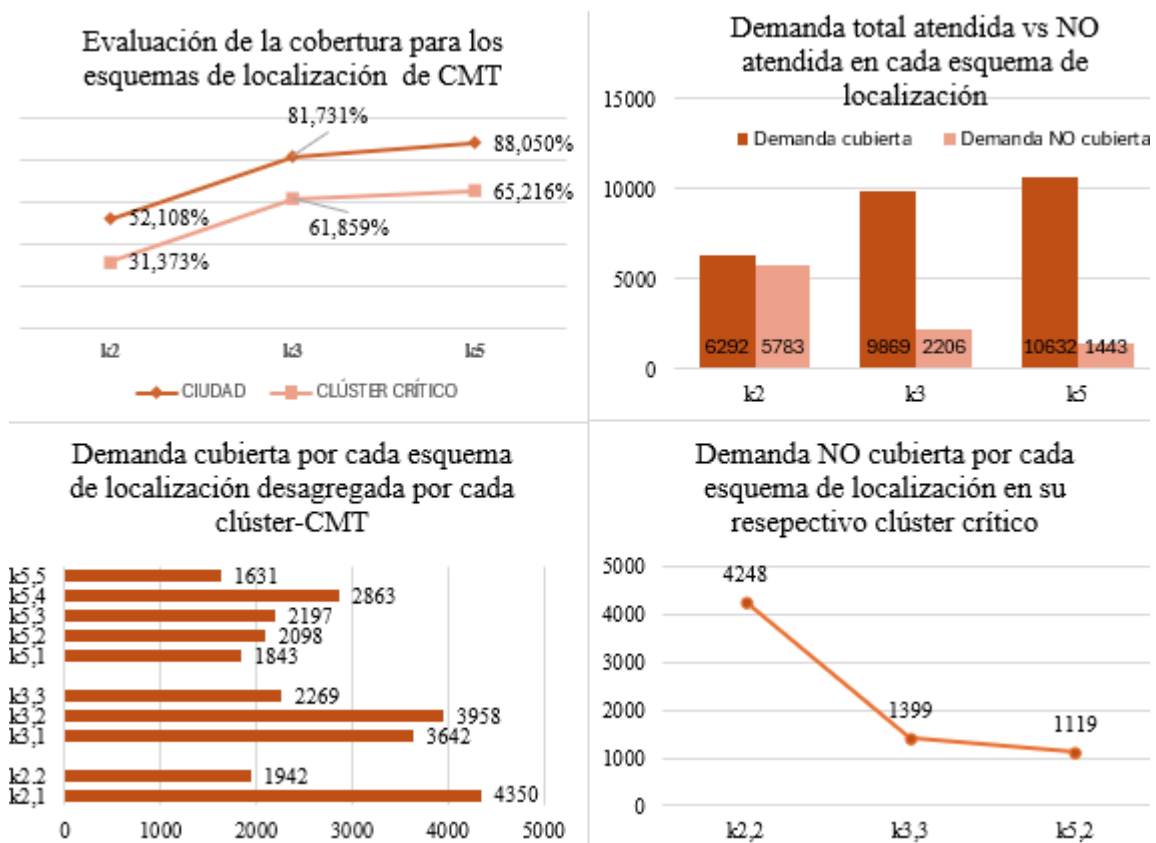
Con el esquema $k = 5$, el sistema de atención alcanza su mayor nivel de desempeño en términos de cobertura diferenciada. La mayor granularidad territorial da lugar a una red de atención más distribuida, con centros médicos temporales ubicados más próximos a las subregiones identificadas como vulnerables. En particular, el clúster 2, nuevamente identificado como el más crítico en este esquema, presenta los mejores niveles relativos de cobertura. Si bien la cobertura

global de la ciudad no aumenta de manera proporcional, los resultados evidencian un compromiso explícito entre equidad territorial y eficiencia operativa, favoreciendo la atención focalizada de las zonas con mayores niveles de vulnerabilidad.

La Figura 17 sintetiza los indicadores de cobertura para cada esquema, así como la demanda total y cubierta a nivel ciudad clúster crítico.

Figura 17

Resumen comparativo de la evaluación de cobertura entre los esquemas de localización.



Se evidencia que el esquema con $k = 5$ ofrece el mejor desempeño en cobertura tanto para el clúster más vulnerable como para la ciudad, garantizando una respuesta diferenciada ante escenarios sísmicos. En este sentido, la demanda cubierta por clúster se establece como insumo clave para caracterizar la capacidad requerida del sistema y constituye la base para las fases

posteriores de toma de decisiones de localización, orientadas al diseño operativo del sistema de atención y a la asignación eficiente de recursos en función de las condiciones reales del territorio.

6. Discusión

6.1 Interpretación de resultados

A lo largo de este proyecto, el objetivo no ha sido únicamente establecer dónde ubicar centros médicos temporales (CMT), sino también evaluar su cobertura dentro de cada clúster y la ciudad, considerando que existen barrios heterogéneos, vulnerabilidad diferencial y posibles restricciones de movilidad tras un sismo. Bajo este enfoque, los resultados presentados en la Tabla 21 de la sección 5.2.4, no se interpretan como un listado de porcentajes, sino como evidencia sobre dónde el sistema responde de manera robusta y dónde, aun con el mejor esquema, persisten brechas que deben gestionarse con decisiones adicionales.

Bajo esta lectura, el esquema con cinco clústeres se consolida como el de mejor desempeño global de cobertura; sin embargo, su importancia real no está en “ganarle” a los otros escenarios, sino en lo que revela: *incluso cuando la ciudad se segmenta más, y el desempeño agregado mejora, el clúster crítico continúa concentrando una demanda no cubierta significativa*. Esto es un hallazgo sustantivo porque cambia la pregunta de diseño. La discusión deja de ser “cuál k es mayor” y se convierte en “qué exige el territorio para que el esquema sea implementable”. El modelo muestra que la zona más vulnerable no solo es prioritaria por su condición social o estructural, sino porque bajo los supuestos del radio dinámico se convierte en el espacio donde la accesibilidad se restringe con mayor fuerza y, por tanto, donde la cobertura es más difícil de lograr mediante una única instalación representativa.

En términos de planificación, esto implica que escoger $k = 5$ no puede interpretarse como un cierre del problema, sino como un punto de partida informado:

-Si el mejor escenario mantiene una brecha relevante en el clúster crítico, entonces la implementación real debe contemplar un plan diferenciado para esa zona, ya sea a través de refuerzos operativos, articulación con infraestructura existente, mecanismos de despliegue adicional o estrategias complementarias que reduzcan el riesgo de dejar demanda potencial no cubierta en el territorio, que precisamente debería priorizarse.

6.2 Implicaciones para la implementación

Dentro del desarrollo del modelo, se incorpora un indicador diseñado para evaluar la cobertura alcanzada por cada clúster. Este indicador no solo permite medir el nivel de atención potencial en función de la ubicación de los CMT, sino que también se convierte en un insumo estratégico para el diseño operativo posterior, al ofrecer información clave sobre la demanda cubierta y no cubierta. Esta cuantificación por clúster permite estimar la magnitud de carga potencial que debería atender cada CMT, y con ello crear un puente hacia decisiones que el modelo deliberadamente no aborda: capacidad, suministros, personal médico y recursos.

Esto significa que, el modelo cumple con su objetivo de proponer esquemas, evaluar su cobertura e identificar zonas más vulnerables, pero simultáneamente proporciona el “mapa de necesidades” que habilita la siguiente fase dentro del contexto de logística humanitaria.

Si ya se conoce cuánta demanda quedaría dentro del alcance de cada CMT, entonces se puede discutir con fundamento qué capacidad mínima debe diseñarse, cómo garantizar inventarios, qué tipo de personal se requiere y qué recursos logísticos deben asegurarse para que la cobertura potencial se convierta en atención efectiva. Realizar esta diferenciación es clave para evitar interpretaciones excesivas, ya que la cobertura que se reporta no pretende ser un sustituto del

desempeño del sistema clínico real, sino la medida espacial que se desarrolló para evaluar los esquemas de localización propuestos dentro del problema abordado dentro de este proyecto.

6.3 Nivel de segmentación

Ahora bien, aunque el incremento de k mejora el desempeño global, la discusión debe ir más allá del “a mayor k , mayor cobertura” y centrarse en por qué no es conveniente segmentar indefinidamente una ciudad como Bucaramanga. Desde la lógica del proyecto, cada nuevo clúster implica la apertura de un nuevo CMT, lo cual tiende a elevar la cobertura. Sin embargo, ese beneficio viene acompañado de un costo operativo creciente.

Un mayor número de CMT no solo implica “más puntos”, sino una expansión real del esfuerzo logístico:

- Incremento en necesidades de coordinación interinstitucional.
- Mayores exigencias de despliegue, supervisión y control.
- Mayor demanda de personal sanitario y de apoyo.
- Mayores volúmenes de insumos, equipos y capacidad de comunicación.

En otras palabras, la mejora de cobertura puede ser marginal frente al salto de complejidad, Además, desde la perspectiva propia de la clusterización, tal como se muestra en la sección 5.2.1, incrementar k de manera excesiva no implica, necesariamente, una mejora en la calidad de la partición. Si bien un mayor número de clústeres puede reducir la heterogeneidad interna, cuando k es demasiado alto los grupos tienden a volverse muy pequeños y altamente sensibles a variaciones marginales en los datos, lo que se traduce en particiones menos robustas y más difíciles de interpretar para fines de planificación. En estos casos, la segmentación puede terminar capturando diferencias locales de baja relevancia, tal que la separación entre clústeres pierde significado práctico y se debilita la segmentación territorial que sustenta el modelo.

6.4 Alcance y aportes

El modelo parte de una caracterización de la ciudad frente a su vulnerabilidad por barrios respecto al riesgo sísmico, con el fin de segmentar la demanda agrupando barrios con perfiles similares, y para caracterizar condiciones de movilidad post-sismo en el momento de definir el radio de cobertura dentro de cada clúster. No obstante, en el desarrollo del proyecto se identifica como limitación central que, en el contexto de Bucaramanga no se dispone de una caracterización local consolidada frente a la vulnerabilidad sísmica y de afectación a nivel de ciudad, barrios o comunas. Por lo tanto, las estimaciones construidas en el desarrollo del modelo en el capítulo 4, deben entenderse como aproximaciones necesarias para hacer operativo el análisis, basadas en la información disponible y las consideraciones del proyecto.

En este sentido, los resultados obtenidos tendrían mayor impacto y utilidad si se contara con estudios locales más detallados y actualizados sobre la vulnerabilidad estructural, movilidad ante escenarios de emergencias y afectaciones esperadas en zonas que se hayan identificado como críticas para la ciudad ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Esta limitación no debilita el aporte de este proyecto, por el contrario, refuerza la importancia de que la ciudad avance hacia mejores sistemas de información para planificación de emergencias, dado que el enfoque multi-fase está preparado para incorporar esa información y producir resultados aún más representativos.

Desde esta perspectiva, el aporte del trabajo para Bucaramanga se vuelve concreto y pertinente porque:

- Provee una metodología replicable que permite pasar de un diagnóstico general de riesgo a una evaluación cuantitativa de esquemas de localización de CMT alineados con la respuesta médica post-sismo, realizando la evaluación con un indicador central de cobertura alineado con la lógica humanitaria, orientado a garantizar atención

oportunamente al mayor número posible de personas y, sobre todo, de reconocer dónde esa atención es más difícil de garantizar.

- Presenta un resultado estratégico clave para la toma de decisiones, incluso en el mejor esquema, el clúster crítico sigue concentrando una fracción importante de demanda no cubierta, lo cual obliga a priorizarlo explícitamente en la planificación.

7. Conclusiones

En este proyecto, el desarrollo y aplicación del modelo multi-fase permitió cumplir el objetivo de proponer esquemas de localización de centros médicos temporales (CMT), integrando de manera coherente la segmentación territorial (clusterización), la definición de una ubicación representativa por clúster y la medición del desempeño mediante indicadores de cobertura a nivel de clúster y ciudad. Con ello, el aporte no se reduce a “obtener ubicaciones”, sino a consolidar un procedimiento reproducible que traduce la decisión de localización en resultados evaluables sobre el territorio, comparables entre escenarios y útiles para la planificación de la respuesta.

En términos de resultados obtenidos, se evidencia que la segmentación territorial (k) condiciona de manera decisiva la capacidad del sistema para cubrir demanda, especialmente en la zona más crítica. Al comparar los esquemas evaluados, se observa que el desempeño global de cobertura evoluciona de 52,108% ($k = 2$) a 81,731% ($k = 3$) y 88,050% ($k = 5$), mientras que el clúster crítico mejora de 31,373% a 61,859% y 65,216%, respectivamente, consolidando $k = 5$ como el mejor esquema. Aunque el mayor salto ocurre entre $k = 2$ y $k = 3$, el esquema $k = 5$ se selecciona porque mantiene el mejor desempeño global y, al mismo tiempo, incrementa la cobertura en la zona más vulnerable frente a $k = 3$.

Sin embargo, la conclusión no es únicamente que “ $k = 5$ es mejor”, sino que incluso en el mejor escenario persiste una brecha relevante de demanda no cubierta en la zona vulnerable. Por tanto, la localización obtenida por el modelo debe entenderse como un punto de partida para la planificación, que exige medidas complementarias (capacidad, refuerzo operativo, articulación con infraestructura existente o despliegues adicionales) precisamente donde la accesibilidad se restringe con mayor fuerza.

Finalmente, el trabajo aporta al contexto local al evidenciar, con una metodología replicable, que Bucaramanga puede transitar de un diagnóstico general de riesgo a una evaluación cuantitativa de cobertura útil para decisiones de preparación y respuesta. A nivel regional y nacional, el modelo refuerza la necesidad de mejorar la disponibilidad de información local consolidada sobre vulnerabilidad estructural y movilidad en emergencia, con el fin de fortalecer la representatividad de los resultados.

8. Recomendaciones

A continuación, se presentan recomendaciones puntuales derivadas de lo evidenciado durante el desarrollo de este proyecto, orientadas a fortalecer su aplicabilidad operativa y su proyección metodológica.

Complementar las localizaciones obtenidas con una verificación operativa en campo y en SIG, orientada a validar si las coordenadas propuestas corresponden a sitios viables para instalar un CMT (condiciones físicas, accesibilidad y disponibilidad); cuando no lo sean, definir el punto factible más cercano para reubicar la instalación y evaluar cómo este ajuste impacta los indicadores de cobertura. Adicionalmente, a partir de la demanda estimada cubierta por clúster y del proceso

de clusterización, analizar la caracterización de necesidades de cada grupo para orientar la planificación del CMT (capacidad, dotación y asignación de recursos) hacia la homogeneidad de los perfiles internos de cada conglomerado y las disparidades entre ellos.

Incorporar explícitamente la incertidumbre del post-sismo mediante escenarios comparables. Esto implica no solo variar parámetros, sino representar cambios plausibles en la demanda y en las condiciones operativas, incluyendo restricciones del entorno y la necesidad de tomar decisiones en varios momentos del desastre.

Pasar de una evaluación desde distancias “en plano” hacia una accesibilidad basada en red, apoyada en GIS, de modo que el desempeño se interprete en términos de conectividad o tiempos de viaje bajo afectaciones viales, idealmente con información que pueda actualizarse si cambia el territorio durante la emergencia.

Referencias Bibliográficas

- Aggarwal, C. C., & Reddy, C. K. (2014). *Data Clustering: Algorithms and Applications* (C.K. Reddy & C. C. Aggarwal, Eds.; 1st ed., Vol. 31). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315373515>
- Aguiar M, L. G., Rentería, R. R., Catumba-Ruiz, J., Barrera, J. O., & Redondo, J. M. (2022). Use of discrete event simulation and genetic algorithms to estimate the necessary resources to respond in a timely manner in the Medical Emergency System in Bogotá. *Medwave*, 22(3), e002100–e002100. <https://doi.org/10.5867/medwave.2022.03.002100>
- Ahmadi-Javid, A., Seyedi, P., & Syam, S. S. (2017). A survey of healthcare facility location. In *Computers and Operations Research* (Vol. 79, pp. 223–263). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.05.018>
- Arias A. (2024). *Modelo de Localización de Albergues Temporales en Caso de Sismo en la Ciudad de Santiago de Cali*. [Tesis de maestría]. Universidad del Valle.
- Aydin, N., & Cetinkale, Z. (2023). Simultaneous response to multiple disasters: Integrated planning for pandemics and large-scale earthquakes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103538>
- Ayvaz, B., & Kuşakci, A. O. (2019). A Fuzzy Integer Programming Model to Locate Temporary Medical Facilities as Part of Pre-Disaster Management. *International Journal of Operations Research and Information Systems*, 10(1), 21–40.
<https://doi.org/10.4018/IJORIS.2019010102>

- Beamon, B. M., & Balcik, B. (2008). Performance measurement in humanitarian relief chains. *International Journal of Public Sector Management*, 21(1), 4–25. <https://doi.org/10.1108/09513550810846087>
- Bustos A, Balbuena A, Ascencio A, Zamora R, Loza L. (2023). Modelos de programación para localización de instalaciones logísticas y criterios de aplicación. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt736.pdf>
- Camacho-Vallejo, J. F., González-Rodríguez, E., Almaguer, F. J., & González-Ramírez, R. G. (2015). A bi-level optimization model for aid distribution after the occurrence of a disaster. *Journal of Cleaner Production*, 105, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.069>
- Carmona, F. S., Hernández, A. O., Rodríguez, L. M. E., & de Jesús Salcedo Hurtado, E. (2024). Vulnerabilidad sísmica, municipio de Toluca: un análisis holístico de los aspectos estructurales, sociales y económicos. *Investigaciones Geograficas*, 82, 105–126. <https://doi.org/10.14198/INGEO.26716>
- Carnero Quispe, M. F., Chambilla Mamani, L. D., Yoshizaki, H. T. Y., & Brito Junior, I. de. (2025). Temporary Facility Location Problem in Humanitarian Logistics: A Systematic Literature Review. In *Logistics* (Vol. 9, Issue 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/logistics9010042>
- Carranza R. & Sánchez J. (2021). Un algoritmo híbrido para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventario de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica. [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Chang, K. H., Chen, T. L., Yang, F. H., & Chang, T. Y. (2023). Simulation optimization for stochastic casualty collection point location and resource allocation problem in a mass casualty incident.

European Journal of Operational Research, 309(3), 1237–1262.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.01.065>

Chase, R. B., Aquilano, N. J., & Jacobs, F. R. (2000). *Administración de producción y operaciones: manufactura y servicios* (8a. ed.). McGraw-Hill.

Choukolaei, H. A., Ghasemi, P., & Goodarzian, F. (2023). Evaluating the efficiency of relief centers in disaster and epidemic conditions using multi-criteria decision-making methods and GIS: A case study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 85.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103512>

Choukolaei, H. A., Mirani, S. E., Hejazi, M., & Ghasemi, P. (2023). A GIS-based crisis management using fuzzy cognitive mapping: PROMETHEE approach (a potential earthquake in Tehran). *Soft Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09260-z>

Church, R., ReVelle, C. (1974) The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association* 32, 101–118. <https://doi.org/10.1007/BF01942293>

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2025). 2024 Disasters in numbers (informe). Brussels, Belgium: CRED https://files.emdat.be/reports/2024_EMDAT_report.pdf

Cozzolino, A. (2012). *Humanitarian Logistics*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-30186-5>

Cuerpo Oficial de Bomberos de Bucaramanga. (2021). Informe de gestión 2021 (Informe de gestión) https://concejobga.cloud/descargas/CONTROL_POLITICO_BOMBEROS_ENERO_2022.pdf

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Data Analysis based on the L1 Norm*. Y. Dodge, Ed, 405-416. data. In *Unsupervised Learning Algorithms* (pp. 71-107). Springer, Cham.

- Daza-Moscoso, M. A., Carnero-Quispe, M. F., & Cárdenas-Medina, J. M. (2024). Localización de instalaciones en logística humanitaria: una revisión de la literatura y consideraciones para futuras investigaciones. *DYNA*, 91(232), 172–180. <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n232.111818>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2025, 22 de abril). Pobreza multidimensional en Colombia: Año 2024 (Boletín técnico). <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PM/bol-PMultidimensional-2024.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (s. f.). Estratificación socioeconómica para servicios públicos domiciliarios. <https://www.dane.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/servicios-informacion/estratificacion-socioeconomica>
- Dirección de Tránsito de Bucaramanga. (2017). Estudio técnico de la zona centro de Bucaramanga (Estudio técnico). <https://transitobucaramanga.gov.co/dtb/wp-content/uploads/2021/09/EstudioTecnicoZonaCentrodeBucaramanga.pdf>
- Ehsani, B., Karimi, H., Bakhshi, A., Aghsami, A., & Rabbani, M. (2023). Designing humanitarian logistics network for managing epidemic outbreaks in disasters using Internet-of-Things. A case study: An earthquake in Salas-e-Babajani city. *Computers and Industrial Engineering*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108821>
- Everitt, B., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis*. Wiley.
- Fadda, E., Manerba, D., Cabodi, G., Camurati, P. E., & Tadei, R. (2021). Comparative analysis of models and performance indicators for optimal service facility location. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102174>

- Fallah, H., NaimiSadigh, A., & Aslanzadeh, M. (2009). Covering problem. In Facility location: Concepts, models, algorithms and case studies. Heidelberg, Germany: Physica Verlag.
- Feng, C.-M., & Wang, T.-C. (2003). Highway emergency rehabilitation scheduling in post-earthquake 72 hours. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*.
<https://east.info/2003journal/papers/3276.pdf>
- Fereiduni, M., & Shahanaghi, K. (2017). A robust optimization model for distribution and evacuation in the disaster response phase. *Journal of Industrial Engineering International*, 13(1), 117–141. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0173-7>
- Francis, R. L., & White, J. A. (1974). *Facility layout and location an analytical approach* (1st ed.). Englewood Cliffs, NJ, US: Prentice-Hall.
- Gallardo, M. (2011). Métodos Jerárquicos de Análisis de Clúster. Recuperado de: www.ugr.es/~gallardo/pdf/cluster-3.pdf.
- Garrido, A., Pongutá, F., & Buitrago, O. Y. (2022). Relocation of public healthcare network of a large city in the event of a major earthquake: a combined methodological analysis. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 12(2), 220–248.
<https://doi.org/10.1108/JHLSCM-04-2021-0040>
- Ghasemi, P., Khalili-Damghani, K., Hafezolkotob, A., & Raissi, S. (2019). Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning. *Applied Mathematics and Computation*, 350, 105–132.
<https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.12.061>
- Gower, J. C. (1971). A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*, 857–871.

- Gulzari, A., & Tarakci, H. (2021). A healthcare location-allocation model with an application of telemedicine for an earthquake response phase. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102100>
- Haeri, A., Hosseini Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Rezaei, M. (2020). A bi-level programming approach for improving relief logistics operations: A real case in Kermanshah earthquake. *Computers and Industrial Engineering*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106532>
- Hassanzadeh, R. (2019). Earthquake population loss estimation using spatial modelling and survey data: The Bam earthquake, 2003, Iran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 421–435. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.023>
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (M. Toledo & P. Roig, Eds.; The McGraw-Hill, Vol. 9). McGraw Hill.
- Hosseini, Y., Mohammadi, R. K., & Yang, T. Y. (2024). A comprehensive approach in post-earthquake blockage prediction of urban road network and emergency resilience optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109887>
- Jiménez S. (2018). *Problemas de la p-mediana Aplicación* (tesis de pregrado). Universidad de Zaragoza, España.
- Kadosh, S. C., Sinuany-Stern, Z., & Bitan, Y. (2023). Location of Emergency Treatment Sites after Earthquake using Hybrid Simulation. *Tehnicki Glasnik*, 17(3), 391–396. <https://doi.org/10.31803/tg-20230511184836>
- Kariv, O., & Hakimi, S. L. (1979). An Algorithmic Approach to Network Location Problems. II: The p-Medians. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 37(3), 539–560. <https://doi.org/10.1137/0137041>

- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (1987). Clustering by means of medoids. *Statistical*
- Kilci, F., Kara, B. Y., & Bozkaya, B. (2015). Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey. *European Journal of Operational Research*, 243(1), 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.035>
- Lafaye de Micheaux, P., Drouilhet, R., & Lique, B. (2013). *The R Software: Fundamentals of Programming and Statistical Analysis* (1st ed. 2013.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9020-3>
- MacQueen, J. (1967, June). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* (Vol. 1, No. 14, pp. 281-297).
- Maldonado Rondón, E., & Chio Cho, G. (2005). Identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga. *Revista UIS Ingenierías*, 4(2), 99–116. Recuperado a partir de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/1961>
- Martínez A. (2021). *Locayal CDMX: Herramienta de Apoyo a la Toma de Decisiones de Localización de Centros de Acopio y Albergues en la Ciudad de México*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mazloum, M., Ahmadi nezhad, A. M., Bakhshi, A., Rabbani, M., & Aghsami, A. (2024). An integrated relief pre-positioning, procurement planning, and casualty type's allocation in a humanitarian supply chain. *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23302674.2024.2436193>
- Melssen, W., Wehrens, R., & Buydens, L. (2006). Supervised Kohonen networks for classification problems. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems: An International Journal*

Sponsored by the Chemometrics Society, 83(2), 99–113.
<https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.02.003>

Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. (2020). In Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585279469>

Navalgund, Ranganath & Menshikov, V. & Akinyede, Joseph. (2011). Space-based disaster management: The need for international cooperation. 62nd International Astronautical Congress 2011, IAC 2011. 11. 9435-9449.

Nickel, S., & Puerto, J. (2005). Location theory : a unified approach (1st ed. 2005.). Springer.
<https://doi.org/10.1007/3-540-27640-8>

Niyazi, M., & Behnamian, J. (2023). Application of cloud computing and big data in three-stage dynamic modeling of disaster relief logistics and wounded transportation: a case study. Environmental Science and Pollution Research, 30(13), 38121–38140.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-24770-3>

Ocola, L. (2005). Peligro, vulnerabilidad, riesgo y la posibilidad de desastres sísmicos en el Perú.

Oksuz, M. K., & Satoglu, S. I. (2020). A two-stage stochastic model for location planning of temporary medical centers for disaster response. International Journal of Disaster Risk Reduction, 44, 101426. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2019.101426>

Oksuz, M. K., & Satoglu, S. I. (2024). Integrated optimization of facility location, casualty allocation and medical staff planning for post-disaster emergency response. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 14(3), 285–303. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-08-2023-0072>

Olcina, J. (2022). Land Use Planning and Green Infrastructure: Tools for Natural Hazards Reduction. In S. Eslamian & F. Eslamian (Eds.), Disaster Risk Reduction for Resilience: Disaster Risk

Management Strategies (pp. 129–146). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-72196-1_6

Olgun, G., & Ozcelik, O. (2024). An optimization framework to evaluate the resiliency of a hospital network based on the seismic vulnerability of a building stock: insights from Bayrakli Izmir. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(3), 1485–1513. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01815-7>

Pons, P. T., & Markovchick, V. J. (2002). Eight minutes or less: does the ambulance response time guideline impact trauma patient outcome? *The Journal of Emergency Medicine*, 23(1), 43–48. [https://doi.org/10.1016/S0736-4679\(02\)00460-2](https://doi.org/10.1016/S0736-4679(02)00460-2)

Popat, S. K., & Emmanuel, M. (2014). Review and comparative study of clustering techniques. *International journal of computer science and information technologies*, 5(1), 805-812.

QGIS.org, 2026. QGIS 3.40. Documentación de la API del Sistema de Información Geográfica. Asociación QGIS. Documento electrónico:
https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/server_manual/index.html

Reese, J. (2006) Solution Methods for the P-Median Problem: An Annotated Bibliography. *Networks*, 48, 125-142. <https://doi.org/10.1002/net.20128>

ReVelle, C. S., & Eiselt, H. A. (2005). Rev. of *Location analysis: A synthesis and survey*. *European Journal of Operational Research*, 165(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.032>

Rodríguez-Espíndola, O., Ahmadi, H., Gastélum-Chavira, D., Ahumada-Valenzuela, O., Chowdhury, S., Dey, P. K., & Albores, P. (2023). Humanitarian logistics optimization models: An investigation of decision-maker involvement and directions to promote implementation. *Socio-Economic Planning Sciences*, 89, Article 101669. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101669>

- Santos Lima, F., De Oliveira, D., Gonçalves, M. B., Marcondes, M., & Samed, A. (2014). Humanitarian Logistics: A Clustering Methodology for Assisting Humanitarian Operations. In *J. Technol. Manag. Innov* (Vol. 9). <http://www.jotmi.org>
- services facilities. *Operations Research*, 19, 1363–1373.
- Sun, H., Li, J., Wang, T., & Xue, Y. (2022). A novel scenario-based robust bi-objective optimization model for humanitarian logistics network under risk of disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102578>
- Sun, H., Wang, Y., & Xue, Y. (2021). A bi-objective robust optimization model for disaster response planning under uncertainties. *Computers and Industrial Engineering*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107213>
- Tan, P.-N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2005). *Introduction to data mining: Vol. Chapter 8* (First edition). Pearson.
- Thomas, A., & Kopczak, L. (2005). *From logistics to supplychain management: The path forward in the humanitarian sector*, white paper, Fritz Institute, San Francisco, CA.
- Thompkins, J., White, J., Bozer, Y., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning: Vol. Chapter 10* (Fourth edition). Wiley.
- Tomašev, N., & Radovanović, M. (2016). Clustering evaluation in high-dimensional
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). The location of emergency
- Trivedi, A., & Singh, A. (2017). A hybrid multi-objective decision model for emergency shelter location-relocation projects using fuzzy analytic hierarchy process and goal programming approach. *International Journal of Project Management*, 35(5), 827–840. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.12.004>

- UMGRDCC. (2021). Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastre y su Adaptación al Cambio Climático (PMGRDCC), Bucaramanga
- UNGRD. (2024). Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres: Una estrategia de desarrollo 2015-2030. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá
- Van Wassenhove, L. N. (2006). Blackett memorial lecture humanitarian aid logistics: Supply chain management in high gear. *Journal of the Operational Research Society*, 57(5), 475–489. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602125>
- Villardón, J. L. V. (2007). Introducción al análisis de cluster. Departamento de Estadística, Universidad de Salamanca. 22p.
- Wierzchoń, S., & Kłopotek, M. (2018). *Modern Algorithms of Cluster Analysis* (1st ed. 2018.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319693088>
- Yi, W., & Özdamar, L. (2007). A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1177–1193. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.077>
- Zhang, W., Huang, C., Gao, J., & Hou, X. (2025a). Robust location-allocation decision considering casualty prioritization in multi-echelon humanitarian logistics network. *Information Sciences*, 695, 121731. <https://doi.org/10.1016/J.INS.2024.121731>
- Zhang, W., Huang, C., Gao, J., & Hou, X. (2025b). Robust location-allocation decision considering casualty prioritization in multi-echelon humanitarian logistics network. *Information Sciences*, 695. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.121731>