

**PROPUESTA DE LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN
CONSIDERANDO DECISIONES DE PRE-POSICIONAMIENTO DE INVENTARIO
PARA LA AYUDA HUMANITARIA EN EL MUNICIPIO DE TULUÁ, VALLE DEL
CAUCA**

JUAN ESTEBAN CÁRDENAS CARDONA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SECCIONAL ZARZAL
2024**

**PROPUESTA DE LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN
CONSIDERANDO DECISIONES DE PRE-POSICIONAMIENTO DE INVENTARIO
PARA LA AYUDA HUMANITARIA EN EL MUNICIPIO DE TULUÁ, VALLE DEL
CAUCA**

JUAN ESTEBAN CÁRDENAS CARDONA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL**

DIRECTOR:

CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SECCIONAL ZARZAL**

2024

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	6
Capítulo 1: Factores clave que influyen en las decisiones de localización de centros de distribución y pre-posicionamiento de inventario.	10
Capítulo 2: Determinación de zonas seguras, identificación de albergues temporales y lugares potenciales para la localización de centros de distribución en Tuluá	18
Capítulo 3: Formulación del modelo matemático para la toma de decisiones.	34
Capítulo 4: Presentación de análisis de resultados y escenarios	50
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Históricos y afectados por desastres naturales en Colombia.....	7
Figura 2. Eslabones de la cadena de suministro humanitaria.....	13
Figura 3. Plano por inundación suelo urbano y expansión.....	19
Figura 4. Ubicación geográfica de los sitios con alto riesgo de inundación	21
Figura 5. Sitios potenciales para la instalación de albergues temporales	23
Figura 6. Criterios para la selección de centros de distribución.	24
Figura 7. Sitios potenciales para la instalación de centros de distribución.....	26
Figura 8. Diagrama de jerarquías AHP.	30
Figura 9. Valores normalizados de cada criterio	33
Figura 10. Resultados del modelo desarrollado en Google Colab.	51
Figura 11. Representación geoespacial de los resultados	53
Figura 12. Resultados del escenario 1 coeficientes de ponderación.	55
Figura 13. Representación geoespacial de los resultados escenario 1.	56
Figura 14. Resultados del escenario 1 coeficientes de ponderación (invertidos)..	57
Figura 15. Resultados del escenario 2 capacidad de centros de distribución	58
Figura 16. Representación geoespacial de los resultados escenario 2.	59
Figura 17. Resultados del escenario 3 demanda de ayuda humanitaria.....	61
Figura 18. Representación geoespacial de los resultados escenario 3.	62

LISTA DE TABLAS

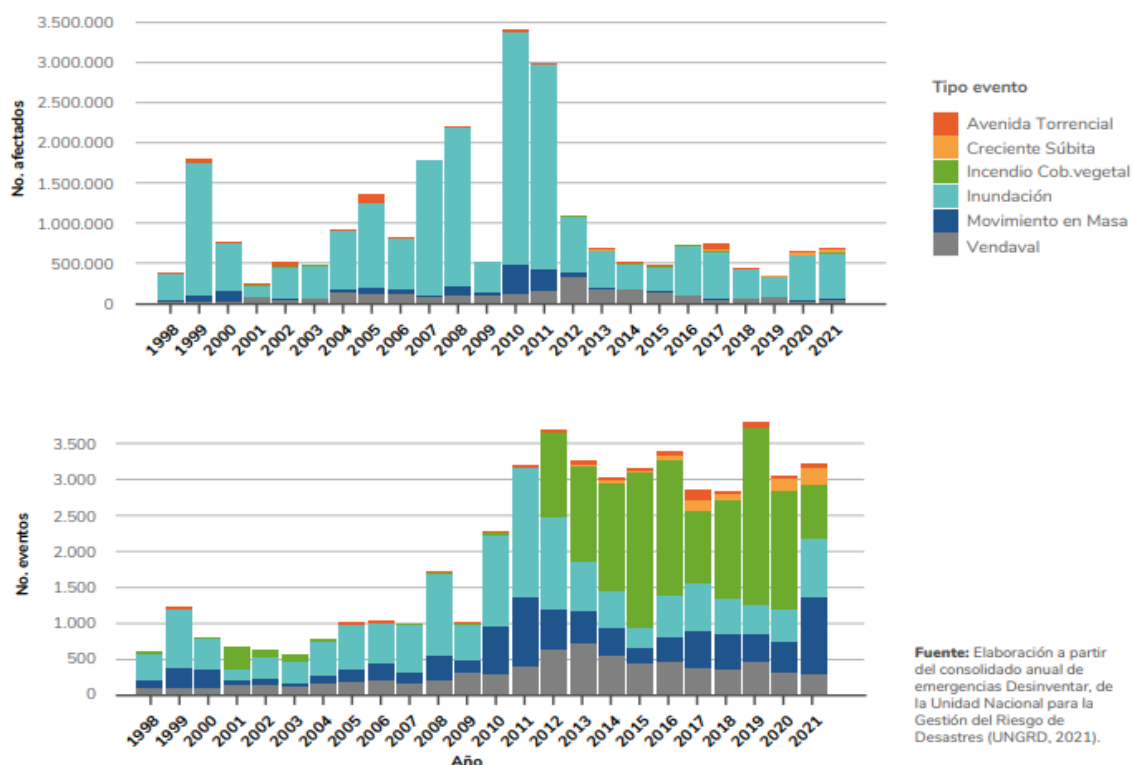
Tabla 1. Criterios de localización y pre-posicionamiento de inventario.....	17
Tabla 2. Lugares con mayor riesgo de inundación.	20
Tabla 3. Zonas para la ubicación de albergues temporales.....	22
Tabla 4. Zonas para la ubicación de centros de distribución	25
Tabla 5. Criterios evaluados en la revisión de la literatura	27
Tabla 6. Escala de calificación Saaty	31
Tabla 7. Comparación pareada de criterios establecidos.	32
Tabla 8. Priorización ponderada de alternativas con base en los criterios	33
Tabla 9. Revisión de la literatura.	35
Tabla 10. Matriz final consolidada (tiempo de respuesta vs costo).....	39
Tabla 11. Priorización ponderada de alternativas (coeficientes de ponderación) ..	39
Tabla 12. Tiempo de transporte en horas (distancia/ velocidad).....	46
Tabla 13. Demanda en términos de kit por familia.....	47
Tabla 14. Capacidad de cada CEDI	47
Tabla 15. Costo fijo de apertura y mantenimiento de inventario pre-posicionado..	49

INTRODUCCIÓN

Colombia es altamente vulnerable a desastres naturales como terremotos, deslizamientos y avalanchas debido a su ubicación geográfica y compleja topografía (Ayala García & Ospino Ramos, 2023). Esta vulnerabilidad es aún mayor en países en desarrollo, donde las pérdidas materiales y humanas generan fuertes presiones económicas (Campos et al., 2012). En Colombia, factores como la pobreza y el desplazamiento aumentan la exposición a riesgos climáticos (Banco Mundial Colombia, 2012, citado en Ayala-García & Ospino Ramos, 2023). Entre 1998 y 2021, los desastres naturales afectaron a 21,5 millones de personas, causaron 3.690 muertes, 675 desapariciones y 6.173 heridos. Las inundaciones, en particular, han sido especialmente devastadoras (UNGRD, 2022).

El Análisis de Situación de Población (ASP) en el año 2023 destaca que las inundaciones han sido el fenómeno con mayor número de afectados en Colombia hasta 2021 (figura 1), desde el año 1998. Además, la UNGRD señala que el Valle del Cauca está entre los 4 departamentos con mayor índice de inundaciones incluyendo a Nariño, Antioquia y Chocó (UNGRD, 2020)). En el año 2020, el Registro Único de Damnificados (RUD) reportó 7.454 afectados y 2.618 familias damnificadas en el Valle del Cauca. Según el Plan de Ordenamiento Territorial Departamental del Valle del Cauca (POTD, 2014), los municipios de Cali, Tuluá y Cartago tienen la mayor exposición a inundaciones.

Figura 1. Histórico de eventos y afectados por desastres naturales en Colombia, 1998-2021.



Fuente: Análisis de Situación de Población (ASP) Colombia 2023.

El municipio de Tuluá, ubicado en la región central del Valle del Cauca, a 102 kilómetros de la ciudad de Cali y 24 kilómetros de Buga, abarca 906.86 kilómetros cuadrados con suelos urbanos, rurales, centros poblados y protegidos. Con una población de 231.962 personas en 2023 (Muñoz et al., 2023), enfrenta un riesgo constante de inundación debido a su ubicación geográfica a lo largo de varios ríos importantes como el Río Morales y el Río Tuluá, que afectan tanto a su población urbana como rural, ya que posee una compleja red de ríos y quebradas que forman la base del sistema acuífero y modelan su paisaje (Alcaldía de Tuluá, 2023).

Según cifras de la UNGRD para el periodo 2009–2015, las fuertes inundaciones en Tuluá afectaron a aproximadamente 677.489 personas y 142.356 familias, dañando 120.729 viviendas y destruyendo 22 de ellas. Desde el 16 de mayo de 2017, Tuluá

ha enfrentado recurrentes emergencias por inundaciones debido a intensas lluvias. En este periodo, una creciente súbita del río Tuluá inundó el corregimiento de Bocas de Tuluá y el sector de Papayal sin llegar a desbordar en la zona urbana, provocando suspensión del servicio de agua por turbiedad (CVC, 2017).

Según los informes consolidados de emergencia publicados por la UNGRD (Consolidados de emergencia UNGRD, 1998 – 2023) el municipio de Tuluá ha enfrentado una serie de eventos históricos de inundación que reflejan una profunda vulnerabilidad a desastres naturales. Las inundaciones, siendo el desastre más recurrente, tienen un impacto significativo en términos de pérdidas económicas y sociales, al causar daños materiales a la infraestructura y afectar los medios de vida de la población, además de representar una amenaza constante para la seguridad y el bienestar de los habitantes locales (Campos et al., 2012). La imprevisibilidad de estos eventos añade un desafío adicional en la gestión de inventarios en los centros de distribución de ayuda humanitaria (Russell, 2005). En este contexto, surge la pregunta de investigación: ¿Cuál debe ser la estrategia para la localización de centros de distribución considerando decisiones de pre-posicionamiento de inventario de artículos de ayuda humanitaria en el municipio de Tuluá, Valle del Cauca, que contribuya a minimizar el tiempo de respuesta y reducir el costo de las operaciones logísticas relacionadas para la atención de la población afectada por inundación? Para abordar esta pregunta, primero se determinaron los factores clave que influyen en las decisiones de localización y pre-posicionamiento de inventario a través de una revisión de la literatura (anexo 1). Posteriormente, se identificaron y definieron las zonas potenciales seguras para establecer los centros de distribución de ayuda humanitaria en el municipio. Además, teniendo como base la revisión de la literatura, se formuló un modelo de toma de decisiones multiobjetivo que integre estos factores críticos contando con la participación de un grupo de expertos que participan en las decisiones asociadas con la gestión de desastres. Finalmente se llevó a cabo un análisis de escenarios del modelo a partir de la variación de

parámetros de interés y su impacto en las decisiones de localización de centros de distribución y pre-posicionamiento de inventario en estos sitios.

Para alcanzar los objetivos específicos del estudio, se empleó la siguiente metodología. Primero, se determinó los factores clave que influyen en la localización y pre-posicionamiento de inventario mediante una revisión de la literatura, utilizando bases de datos académicas y universitarias. Luego, se identificaron y definieron las zonas potenciales seguras para los centros de distribución utilizando la metodología AHP, en colaboración con un grupo de expertos y una investigación detallada para establecer los criterios clave. A continuación, se formuló un modelo de toma de decisiones multiobjetivo integrando los factores críticos identificados, basado en una revisión de modelos multiobjetivo y el modelo p-mediana, e incorporando decisiones de pre-posicionamiento de inventario. Finalmente, se realizó un análisis de escenarios del modelo para evaluar el impacto de diferentes variables y condiciones, lo que facilitó la identificación de estrategias óptimas para su implementación.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo general propuesto, el trabajo se ha estructurado en cuatro capítulos que abordan de manera detallada cada uno de los objetivos específicos establecidos. El primer capítulo analiza los factores clave que influyen en las decisiones de localización y pre-posicionamiento de inventario, mediante una revisión de la literatura. El segundo capítulo aborda las herramientas y el marco conceptual para la identificación de zonas en riesgo, así como la selección de centros de distribución de ayuda humanitaria y albergues. En el tercer capítulo, se formula y aplica el modelo basado en el análisis y la revisión de estudios previos. El cuarto capítulo se dedica al análisis de resultados obtenidos y la discusión de los hallazgos en diversos escenarios.

Finalmente, en la sección de conclusiones y trabajos futuros, se sintetizan los resultados obtenidos, destacando las implicaciones clave del estudio. Además, se

sugieren posibles líneas de investigación para el desarrollo de modelos más avanzados que incorporen factores adicionales.

Capítulo 1: Factores clave que influyen en las decisiones de localización de centros de distribución y pre-posicionamiento de inventario.

Este capítulo tiene como objetivo identificar y analizar los factores clave que afectan la logística de la distribución de ayuda humanitaria, proporcionando una visión integral de los desafíos a los que se enfrenta la gestión de cadenas de suministro para la fase de preparación de la gestión de desastres. A continuación, se detallan los principales factores que inciden en la eficacia de estas operaciones, subrayando la importancia de la previsión, la coordinación, y la gestión de inventarios en la respuesta a desastres.

Según diversos autores, la distribución de ayuda humanitaria enfrenta numerosos desafíos logísticos, destacando varios factores críticos. Según Hashemi et al. (2020) citado en Rodríguez et al. (2021) destaca que la imprevisibilidad es uno de los mayores retos, ya que abarca la incertidumbre en cuanto a la ocurrencia de desastres, su ubicación, magnitud y temporalidad. Además (Rodríguez et al, 2021) también añade que, esta incertidumbre agrega una capa de complejidad considerable a la gestión de las cadenas de suministro humanitarias.

Según Chandes y Paché (2009) otro factor crucial es la dificultad en la coordinación del personal. La respuesta a un desastre involucra a múltiples actores que, debido a sus disparidades, pueden encontrar obstáculos para coordinar el personal de manera efectiva, lo que puede comprometer la respuesta óptima (Chandes y Paché, 2009). Las operaciones en situaciones de desastre suelen ser caóticas y complicadas, lo que puede desmotivar a los voluntarios y al personal de ayuda, resultando en una menor participación en futuros eventos (Reyes Rubiano, 2016).

Dos factores adicionales que complejizan aún más la distribución de ayuda son las donaciones no solicitadas, ya que a menudo no coinciden con las necesidades reales de los afectados, generando complicaciones en la cadena de suministro (Russell, 2005). Además, el nivel de inventario es un aspecto crucial, ya que determinar los niveles óptimos de inventario para cada punto de distribución es un desafío debido a la imprevisibilidad (Aslan, E., & Çelik, M. 2019).

Del mismo modo, la planificación y preparación ante emergencias y desastres son fundamentales para minimizar las consecuencias negativas de estos eventos, tanto directas como indirectas (Opit, P. F. 2018). Los planes de prevención, preparación y respuesta buscan reducir la vulnerabilidad y asegurar la supervivencia, además de disminuir los costos asociados a los daños materiales (Superintendencia Nacional de Salud, 2021). En este contexto, la logística humanitaria juega un papel crucial, ya que su éxito depende de la pronta ejecución de actividades logísticas, la coordinación entre actores y la eficiente organización y entrega de suministros (Ülkü et al., 2015).

El pre-posicionamiento de inventarios es una estrategia clave en la logística humanitaria, ya que permite aumentar la preparación ante desastres naturales al determinar la ubicación y cantidad de suministros de ayuda en condiciones de incertidumbre (Rawls & Turnquist, 2010). Esta estrategia, combinada con la ubicación estratégica de centros de distribución, contribuye a reducir el tiempo de respuesta ante emergencias, lo que resulta en una atención más rápida y efectiva para las personas afectadas (Romero, 2017). Al implementar esta planificación, se minimiza el tiempo de reacción, garantizando que un mayor número de personas, especialmente las de áreas remotas o de difícil acceso, reciban la asistencia necesaria, (VanRooyen y Leaning, 2005, citados en la investigación de Reyes Rubiano, 2015).

La logística humanitaria se desarrolla a través de una secuencia de etapas que incluyen mitigación, preparación, respuesta y recuperación (Gómez Ramírez & Sarache Castro, 2016). Comprender y definir con precisión la etapa en la que se llevará a cabo la propuesta de localización de centros de distribución con decisiones de pre-posicionamiento de inventario, es crucial para el desarrollo del trabajo. A continuación, se describe cada etapa en detalle:

Mitigación: se enfoca en anticipar y prevenir posibles crisis o desastres mediante la identificación de riesgos y la implementación de medidas preventivas, abarcando todas las acciones que evitan un desastre, ya que esto reduce la probabilidad de su ocurrencia o disminuye sus consecuencias destructivas (Kaynak y Tuğer, 2014, como se citó en Gómez Ramírez & Sarache Castro, 2016).

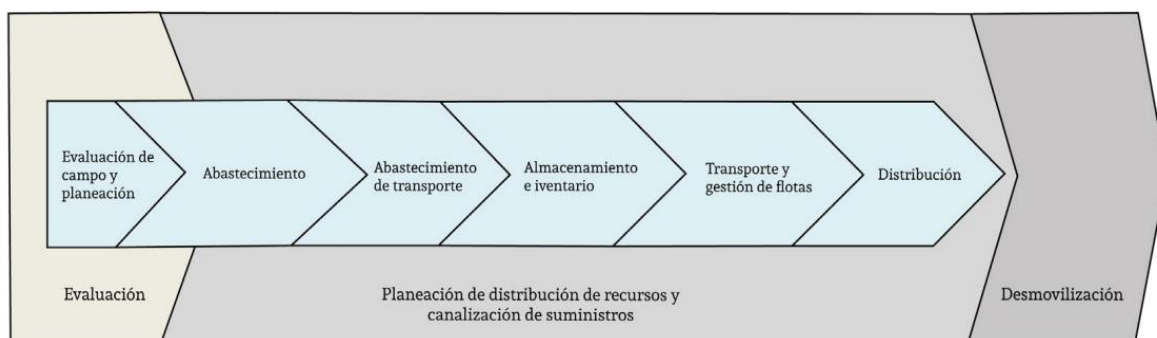
Preparación: busca fortalecer las capacidades logísticas y operativas antes de eventos adversos, realizando actividades como evaluación de necesidades, compras, recepción de donaciones y asignación de personal (Tomasini y Van Wassenhove, 2009).

Respuesta: se activa inmediatamente después del desastre, incluyendo acciones vitales como búsqueda y rescate, recopilación de datos, establecimiento de refugios, planificación de evacuaciones y distribución de suministros esenciales (Tzeng, et al., 2007; Holguín-Veras, et al., 2013 como se citó en Vargas & Aguirre, 2016).

Recuperación: se orienta a restablecer la estabilidad previa al desastre mediante la reconstrucción de infraestructura, rehabilitación de servicios básicos y apoyo psicosocial a los afectados (Holguín-Veras, Pérez, Jaller, Van Wassenhove y Aros-Vera, 2013 como se citó en Vargas & Aguirre, 2016).

La cadena de suministro humanitaria se erige como un pilar central en la gestión de crisis y emergencias, representando un área de estudio y práctica crucial en el ámbito académico y profesional (Santos Hernández & Ruvalcaba Sánchez, 2019). A diferencia de la cadena de suministro generalizada, la logística humanitaria involucra decisiones que intervienen directamente en acciones de refugio y ayuda inmediata, atención a las necesidades básicas de alimentación, vestimenta, salud física y psicológica (Carrasco, 2017). La cadena de suministro humanitaria se constituye como una compleja red de eslabones interconectados (figura 2), cuya colaboración resulta fundamental para garantizar la entrega oportuna y efectiva de asistencia en momentos críticos (Das, 2016 como se citó en Pérez Salazar, 2020). Como se describe en la figura 2 Cada eslabón abarca una variedad de actividades y funciones esenciales que van desde la evaluación de campo y planeación hasta la distribución logística a la población damnificada.

Figura 2. Eslabones de la cadena de suministro humanitaria.



Fuente: Das, 2016 citado por Pérez Salazar, 2020.

La planificación se erige como un proceso de toma de decisiones que implica la selección entre distintas alternativas disponibles (Das, 2016 como se citó en Pérez Salazar, 2020). Das (2016) también añade que estos procesos de planificación y evaluación son fundamentales para asegurar que las fases subsecuentes, desde el

abastecimiento hasta la distribución, se desarrollen de manera coherente y alineada.

De acuerdo con Balcik y Beamon (2008), citado en Aslan, E., & Çelik, M. (2019), para asegurar la disponibilidad de provisiones de ayuda, las comunidades locales y las entidades no gubernamentales suelen emplear dos estrategias: la adquisición posterior al desastre de proveedores locales o internacionales, o bien, el posicionamiento de suministros en anticipación al desastre. La gestión anticipada de inventarios en cadena de la logística humanitaria implica prever y organizar recursos para atender crisis de forma eficiente, actuando proactivamente al movilizar suministros de socorro antes de un desastre (Opit, 2018).

El diseño de una red de pre-posicionamiento de inventario generalmente implica tres decisiones fundamentales (Aslan, E., & Çelik, M. 2019), las cuales son:

- ¿Dónde ubicar las instalaciones de socorro (Centro de distribución)?
- ¿Qué tipo de suministros de socorro se deben almacenar?
- ¿Cuánto suministro de socorro se debe almacenar en cada una de las instalaciones?

La gestión de los centros de distribución juega un papel fundamental en el diseño de una red de pre-posicionamiento de inventario (Opit, 2018). Estos centros actúan como nodos estratégicos donde se almacenan productos clave, permitiendo una distribución eficiente y oportuna en momentos de demanda (Aslan, E., & Çelik, M. 2019). Un centro de distribución se conceptualiza como un sitio físico destinado al almacenamiento de una amplia gama de productos o materia primas, además sirven como punto de consolidación y distribución (Arrieta Posada, J. G. 2011). Los modelos de localización con pre-posicionamiento determinan dónde ubicar instalaciones y cuánto inventario almacenar para satisfacer la demanda máxima, optimizando la capacidad para cubrir las necesidades previstas (Romero, 2017).

La ubicación de un centro de distribución es un aspecto crítico para el éxito de cualquier operación logística; esta debe ser determinada en el área geográfica o región que se planea cubrir, considerando múltiples factores estratégicos (Sharif & Salari, 2015). Entre estos se incluyen los recursos disponibles, la densidad y características demográficas, la disponibilidad de fuerza laboral calificada, accesibilidad a redes de transporte, cercanía a consumidores finales, y fuentes de energía (Chicas et al., 2009).

El Manual de Estandarización de Ayuda Humanitaria de Colombia (AHE) de la UNGRD (Manual de Estandarización de Ayuda Humanitaria, 2013) establece dos tipos de asistencia: la ayuda alimentaria, que garantiza acceso constante a alimentos seguros y nutritivos para un desarrollo saludable (FAO, 2006, citado en Salazar & Gonzalo, 2019), y la ayuda no alimentaria, que proporciona recursos esenciales para satisfacer necesidades básicas no alimentarias, como higiene, protección, y refugio. Esta última es clave para la seguridad personal y la resistencia frente a enfermedades y condiciones climáticas adversas (UNGRD, 2013). Para el desarrollo de la propuesta se tendrá en cuenta un producto por familia, considerado como kit de ayuda humanitaria, el cual integra la ayuda alimentaria y no alimentaria.

Según la Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna (2008), los albergues temporales son lugares seguros creados para alojar a personas afectadas por desastres, garantizando su dignidad humana, la unidad familiar, y la estabilidad física y psicológica. El objetivo es asegurar que quienes han sido desplazados de sus hogares puedan disfrutar de sus derechos humanos básicos mientras están en un alojamiento temporal (OIM, 2012).

La gestión de recursos en estos albergues es crítica debido a los altos costos operativos, incluso en los de corta duración (OIM, 2017) también añade que es fundamental que la planificación cuente con los recursos adecuados, ya que una

inversión en preparación y reducción de riesgos puede tener un impacto significativo. La infraestructura también es un factor clave, de acuerdo con "El Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres en la guía emitida en junio del 2011," la alcaldía municipal, con apoyo departamental, debe asegurar que los albergues cuenten con servicios esenciales como agua, energía eléctrica, recolección de basuras, áreas comunes, salud, seguridad y transporte público.

La ubicación de los albergues temporales debe ser cuidadosamente evaluada por personal capacitado para garantizar que estén alejados de la zona afectada y no expuestos a nuevas amenazas (OIM 2012). Es vital que los albergues cumplan con condiciones mínimas de protección y promuevan la conservación ambiental.

La optimización de la cobertura y el tiempo de respuesta en situaciones de emergencia, la gestión eficiente de los recursos, y la consideración de aspectos críticos como la infraestructura, la seguridad, y la accesibilidad de las ubicaciones seleccionadas son factores críticos en la distribución de ayuda humanitaria (Federación Internacional de la Cruz Roja, 2008). Estos factores son esenciales para el desarrollo de estrategias que buscan mejorar la capacidad de respuesta y la resiliencia ante desastres, garantizando así la protección y el bienestar de las poblaciones afectadas (OIM 2017).

A continuación, se presenta la revisión de la literatura con base en los criterios relevantes definidos por los autores (tabla 1) para abarcar los factores clave que influyen en las decisiones de localización de centros de distribución y pre-posicionamiento de inventario.

Tabla 1. Criterios relevantes para abarcar los factores clave que influyen en las decisiones de localización y pre-posicionamiento de inventario.

Autor \ Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Arrieta Posada (2011)			x			x							
Aslan, E. & Celik, M. (2015)	x		x	x	x				x		x	x	x
Carrasco (2017)	x	x	x		x	x		x		x		x	x
Chandes & Pache (2009)		x	x		x	x		x	x				x
Chicas et al, (2009)			x	x	x								
Federeción Internacional Cruz Roja (2008)	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	
OIM (2017)						x	x		x				
Opit (2018)	x		x	x	x	x			x				
Pérez Salazar (2020)	x		x		x	x				x	x	x	x
Rawls & Turnquist, (2010)	x		x	x	x	x			x	x	x		
Reyes Rubiano (2016)		x	x		x	x	x		x			x	x
Rodríguez, et al, (2012)			x		x						x		
Romero (2017)	x		x	x	x				x				
Rusell (2005)			x					x			x	x	x
Santos Hernández & Ruvalcaba Sánchez (2019)			x		x						x	x	x
Sharif & Salari (2015)			x		x	x			x				
Tomasini & Van Wassenhove (2009)	x	x	x		x			x	x		x	x	x
Ülkü, et al, (2015)			x		x			x				x	x
Vargas & Aguirre (2016)	x		x		x				x	x	x	x	x

Criterios de evaluación: 1. Previsión, 2. Cordinación del personal, 3. Gestión de suministros, 4. Pre-posicionamiento de inventario, 5. Planificación logística, 6. Centros de distribución, 7. Albergues temporales, 8. Donaciones, 9. Tiempo de respuesta, 10. Etapas de la logística humanitaria, 11. Imprevisibilidad, 12. Respuesta a desastres. 13. Cadena de suministro humanitaria

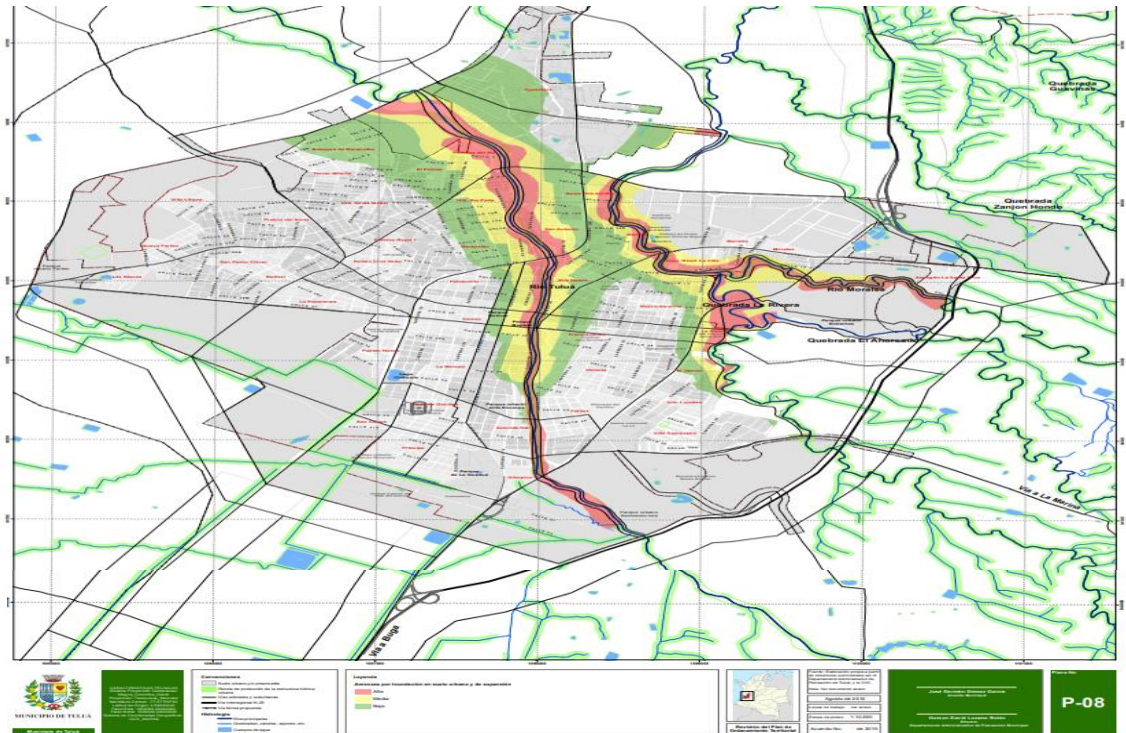
Fuente: Elaboración propia

La revisión de la literatura basada en los criterios establecidos por los diferentes autores proporciona una visión integral de los factores clave que afectan la localización de centros de distribución y el pre-posicionamiento de inventario en situaciones de emergencia. Al analizar y comparar diversos estudios, se identificaron patrones comunes y diferencias en la forma en que los modelos abordan la optimización de la distribución y la preparación para desastres. Esta revisión destaca la importancia de considerar múltiples criterios, ya que sienta las bases para el desarrollo del modelo.

Capítulo 2: Determinación de zonas seguras, identificación de albergues temporales y lugares potenciales para la localización de centros de distribución en Tuluá

La identificación de las zonas de riesgo dentro del municipio objeto de estudio se realizará tomando como referencia principal el Plan de Ordenamiento Territorial (POT). Este plan proporciona la estructura para el análisis, utilizando información contenida en el Plan de Gestión de Riesgo vigente. A partir de esta información, se clasifican las áreas del municipio de Tuluá según su nivel de amenaza. Estas clasificaciones están representadas visualmente en el Mapa de Amenaza por inundación para suelo urbano y áreas de expansión (figura 3).

Figura 3. Plano número P-08 Amenaza por inundación suelo urbano y expansión.



Fuente: Plan de ordenamiento territorial, 2015.

El análisis descrito de el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio (POT, 2014), describe la situación de riesgo por zonas y barrios destacando que la zona con alto riesgo de inundación relacionada con el río Tuluá, los sectores cercanos al río en los barrios Centro y Victoria presentan una amenaza significativa, especialmente a partir del puente en la Calle 27, donde la zona de alto riesgo se extiende hacia aguas abajo. Esta expansión abarca diferente vías y áreas topográficas, alcanzando sectores de los barrios Franciscanos, Céspedes, Tomás Uribe, Villanueva, Popular, Trinidad, San Antonio, El Jardín, Inmaculada, Riopaila, Siete de Agosto y Portales del Río. Mientras que en la zona de alto riesgo de inundación asociada con el río Morales y la quebrada La Rivera, el peligro se concentra en áreas aledañas al río en los barrios Jardín y La Rivera, y también a lo largo del margen oriental de la Carrera 40. Este riesgo afecta a varios barrios, como Las Villas, Popular y El

Bosque, así como a sectores a lo largo de ambas márgenes en el corregimiento de Aguacalara.

Con fundamento en la inspección llevada a cabo por el equipo especializado en evaluación de riesgos para la revisión y actualización del POT durante el mes de marzo de 2014, se procedió a documentar los sitios identificados como más susceptibles a inundaciones, según se detalla a continuación (tabla 2).

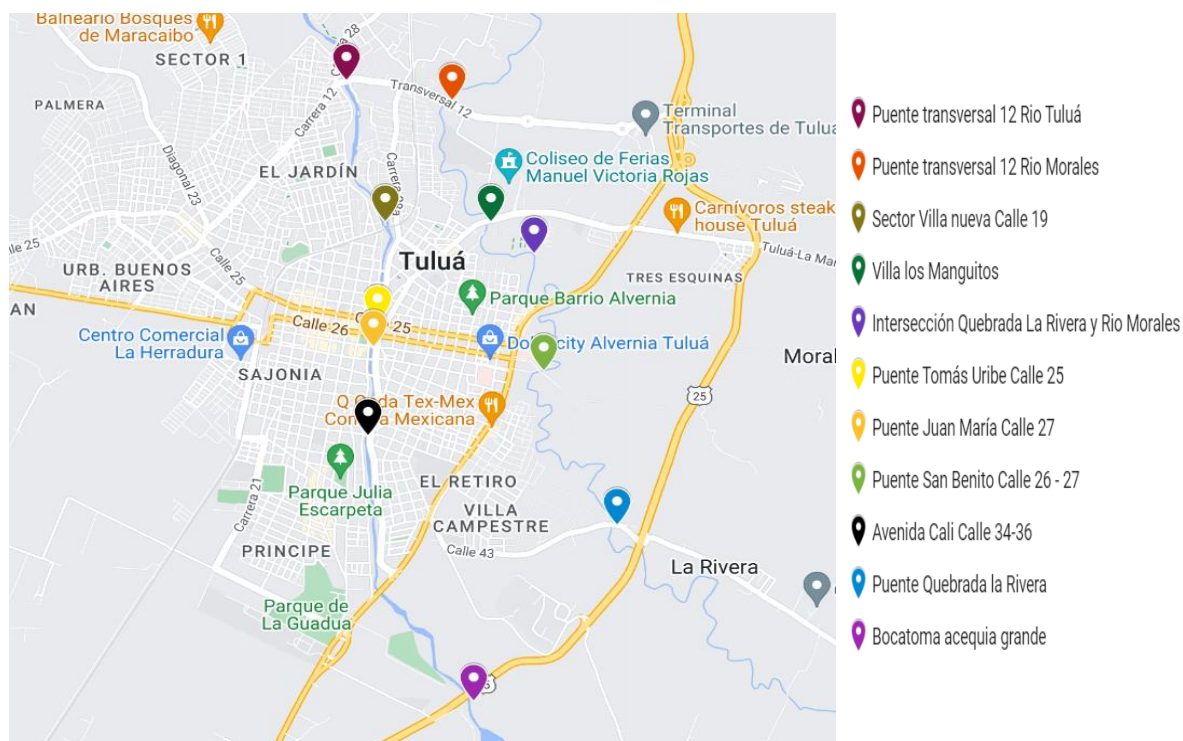
Tabla 2. Lugares con mayor riesgo de inundación.

SITIO	COORDENADAS	GRADOS DECIMALES	
		LATITUD (Y)	LONGITUD (X)
Puente Quebrada la Rivera	4°04'18"N 76°10'47"W	4,071667	-76,179722
Botacoma Acequia Grande	4°03'34"N 76°11'20"W	4,059444	-76,188889
Puente Juan María Calle 27	4°05'02"N 76°11'43"W	4,083889	-76,195278
Avenida Cali con Calle 24 - 26	4°04'40"N 76°11'44"W	4,077778	-76,195556
Puente Tomás Uribe Calle 25	4°05'08"N 76°11'42"W	4,085556	-76,195000
Sector Villanueva Calle 19	4°05'33"N 76°11'40"W	4,092500	-76,194444
Puente Transversal 12 Río Tuluá	4°06'08"N 76°11'49"W	4,102222	-76,196944
Puente Transversal 12 Río Morales	4°06'03"N 76°11'25"W	4,100833	-76,190278
Villa los Manguitos	4°05'33"N 76°11'16"W	4,092500	-76,187778
Intersección Quebra. Rivera y Río Morales	4°05'25"N 76°11'06"W	4,090278	-76,185000
Puente San Benito Calle 26 - 27	4°04'56"N 76°11'04"W	4,082222	-76,184444

Fuente: Elaboración propia con base a la revisión general y ajuste al Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Tuluá, Valle del Cauca

Con el registro de las coordenadas de los sitios con alto riesgo de inundación, se llevó a cabo la representación gráfica de su ubicación geoespacial. Este proceso permite una visualización detallada de la distribución espacial de estos puntos críticos dentro del contexto geográfico del área de estudio. Posteriormente, se presenta dicha visualización (figura 4), resaltando la ubicación precisa de cada sitio identificado en la tabla previa.

Figura 4. Ubicación geográfica de los sitios con alto riesgo de inundación



Fuente: Elaboración propia a través de Google Maps.

VanRooyen y Leaning (2005), citados en la investigación de Reyes Rubiano (2015), enfatizan que la delimitación de zonas potenciales está intrínsecamente vinculada a las particularidades de cada área y al riesgo inherente a estas circunstancias, dada la presencia de una probabilidad de peligro. Además, señalan que la localización consiste en identificar lugares óptimos para instalar los albergues y puntos de distribución. Se puede hablar de una localización óptima cuando las zonas en la que están ubicadas las instalaciones permiten el suministro de bienes y servicios, por ejemplo: acceso a agua potable, combustible para cocinar, iluminación, eliminación de desechos y evacuación de aguas residuales. Además de la protección contra el frío, la humedad, el calor, la lluvia, el viento, y otros riesgos presentes en la situación; estos son los requisitos mínimos establecidos por las organizaciones de ayuda humanitaria (SCHR/VOICE/ICVA, 2004). Las zonas

potenciales identificadas para ubicar los albergues temporales (tabla 3) difieren en cuanto a la disponibilidad de instalaciones adecuadas o propicias en el municipio de Tuluá, debido a esto se hace uso de centros de salud, centros recreativos, establecimientos públicos, privados y educativos (POT, 2014).

Tabla 3. Zonas para la ubicación de albergues temporales.

Zonas para la ubicación de albergues temporales	
1	Coliseo de ferias Manuel Victoria Rojas
2	Colegio Salesiano San Juan Bosco
3	Coliseo Benicio Echeverry
4	Estadio Doce de Octubre
5	Institución Educativa Aguaclara
6	Institución Educativa Técnica Occidente
7	Parque Julia Escarpeta
8	Institución Educativa Julia Restrepo
9	Institución Educativa Gimnasio del Pacífico

Fuente: Elaboración Propia tomando en cuenta los criterios establecidos por la Cruz Roja Colombiana, 2008.

Después de analizar las posibles ubicaciones para los albergues temporales descritos en la tabla, es crucial ahora visualizar estas opciones en un contexto geográfico (figura 5).

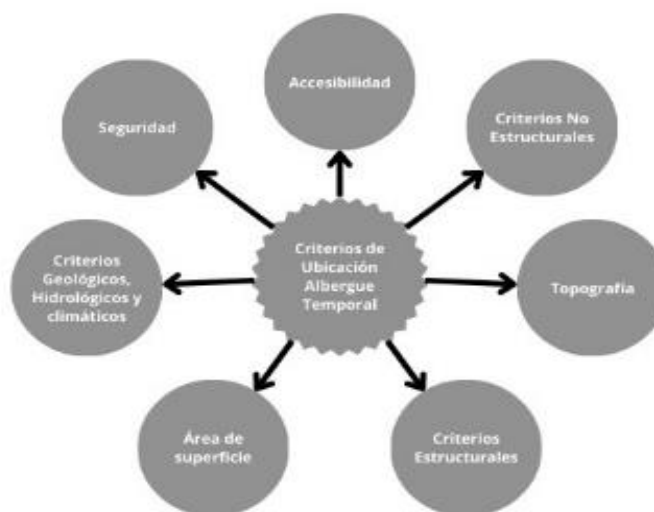
Figura 5. Ubicación geográfica de sitios potenciales para la instalación de albergues temporales



Fuente: Elaboración Propia a través de Google Maps.

Para la identificación y selección de potenciales centros de distribución, se emplearán los criterios definidos por la Cruz Roja Colombiana (2008). Estos criterios (figura 6), que están fundamentados en estándares internacionales de logística humanitaria, son adaptados a las necesidades y particularidades locales, garantizando la distribución de ayuda humanitaria en situaciones de emergencia y crisis.

Figura 6. Criterios para la selección de centros de distribución.



Fuente: Manual Nacional para el empleo de sitios temporales, Sociedad Nacional de la Cruz Roja Colombiana, 2008.

La selección de los posibles o potenciales lugares para la localización de centros de distribución se realizará mediante una revisión en campo visitando lugares sugeridos por un grupo de expertos pertenecientes a organizaciones no gubernamentales, secretaria de Gestión del Riesgo, la Junta de la Defensa Civil, la Cruz Roja y el Cuerpo de Bomberos, además de la participación de la comunidad. Este proceso implica visitas detalladas a las ubicaciones candidatas, evaluando factores como accesibilidad, infraestructura disponible y seguridad del entorno en base a los criterios mencionados anteriormente. La observación directa permitirá identificar puntos estratégicos que optimicen la logística y garanticen una distribución eficiente y rápida de los recursos en situaciones de emergencia.

A continuación, se presentan los lugares visitados durante esta revisión (tabla 4), destacando aquellos que cumplen con los criterios establecidos y son considerados como potenciales centros de distribución.

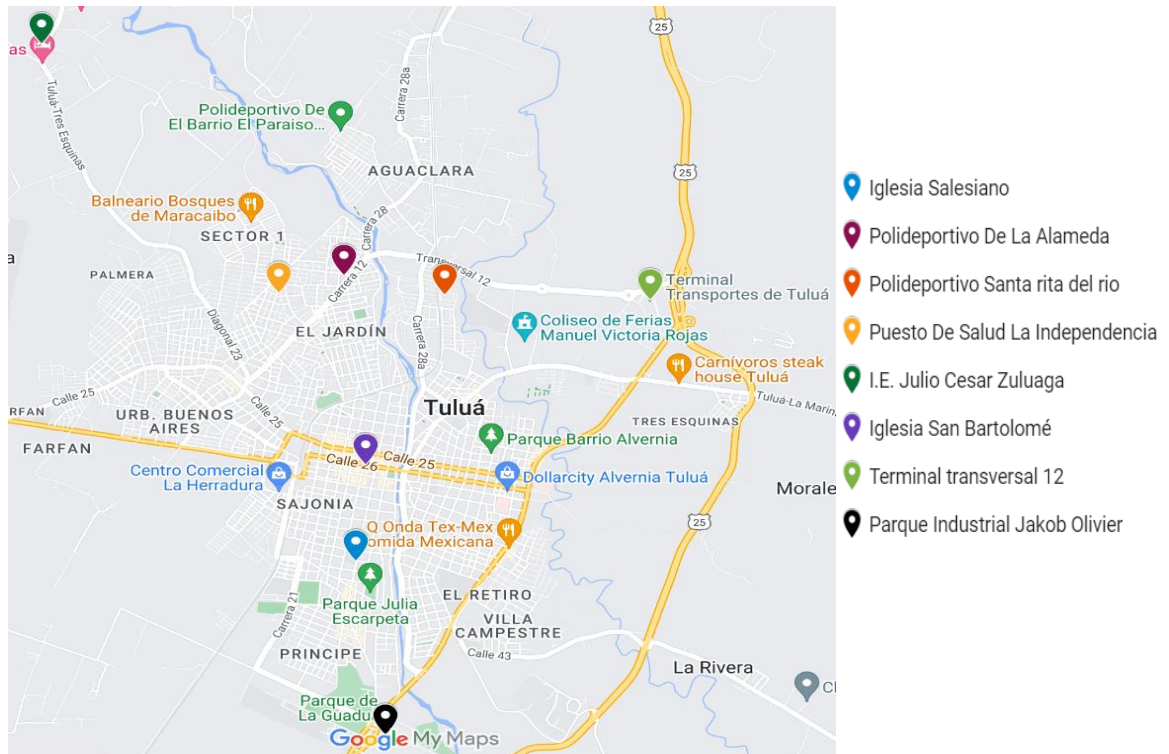
Tabla 4. Zonas para la ubicación de centros de distribución

Zonas para la ubicación de centros de distribución
1 Iglesia Salesiano
2 Parque Industrial Jacob Olivier
3 Polideportivo La Alameda
4 Polideportivo Santa Rita del Rio
5 Puesto de Salud la independencia
6 Institución Educativa Julio Cesar Zuluaga
7 Iglesia San Bartolomé
8 Terminal Transversal 12

Fuente: Elaboración Propia.

Con la identificación de las posibles ubicaciones para los centros de distribución detallada en la tabla, resulta práctico contextualizar estas opciones geográficamente. Para ello, se presenta un mapa específico (figura 7) que ilustra de manera clara la distribución espacial de los sitios considerados.

Figura 7. Ubicación geográfica de sitios potenciales para la instalación de centros de distribución



Fuente: Elaboración Propia a través de Google Maps.

La selección de los sitios potenciales para la ubicación de centros de distribución en el municipio de Tuluá es fundamental para el desarrollo de la propuesta. Este proceso requiere una evaluación que considere múltiples criterios relevantes, los cuales han sido identificados y respaldados por la literatura (tabla 5). Para abordar esta complejidad, se han empleado modelos de toma de decisiones multicriterio, los cuales permiten analizar diversas alternativas bajo diferentes criterios y escenarios (Figueira et al., 2005).

Tabla 5. Criterios evaluados en la revisión de la literatura con base a modelos de toma de decisiones multicriterio.

Autor (Año)	Herramienta
Behzadian et., al (2010)	PROMETHEE
Brans et., al (1984)	PROMETHEE
Carvajal Ramírez, D. (2023)	ELECTRE, PROMETHEE, AHP
Ćirović & Pamučar (2022)	TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, AHP
Ercole, Alberto, & Carignano (2007)	TOPSIS
Figueira, J. R., Greco, S., & Ehrgott, M. (2005)	ELECTRE, PROMETHEE, AHP
Forman & Gass (2001)	AHP
Ishizaka & Labib (2011)	AHP
Jha, A. K., & Jha, S. (2021).	AHP
Mardani, Jusoh, & Nor (2018)	TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, AHP
Saaty (1980)	AHP
Taherdoost & Madanchian (2023)	ELECTRE
Vargas (1990)	AHP

Fuente: Elaboración propia.

El método AHP (Analytic Hierarchy Process) cuenta con la capacidad de descomponer el problema en una jerarquía, lo que facilita la evaluación clara de múltiples criterios (Saaty, 1988). Este enfoque es especialmente útil cuando los problemas incluyen tanto datos cualitativos como cuantitativos, permitiendo así una comparación más estructurada y consistente de las alternativas (Vargas, 1990). En comparación con métodos como TOPSIS, que se basa en encontrar la proximidad a una solución ideal, la metodología AHP asegura mayor flexibilidad para integrar diversos tipos de datos (Ishizaka & Labib, 2011). Además, investigaciones recientes han destacado el papel del AHP en la planificación logística, en la que intervienen múltiples actores y criterios cambiantes (Jha & Jha, 2021).

TOPSIS, por otro lado, identifica la mejor opción en función de su cercanía a una solución ideal positiva y su distancia de una solución ideal negativa (Ercole, Alberto, & Carignano, 2007). Este método es valioso en situaciones donde los criterios se pueden cuantificar con precisión, pero presenta limitaciones cuando se aplican a problemas con incertidumbre o juicios subjetivos (Mardani, Jusoh, & Nor, 2018). En este sentido, AHP proporciona una ventaja significativa al permitir que los expertos realicen comparaciones cualitativas y ponderen criterios en función de su experiencia (Saaty, 1988).

El método PROMETHEE también ha demostrado ser eficaz para clasificar alternativas, especialmente en la toma de decisiones multicriterio (Brans et al., 1984). Sin embargo, PROMETHEE no maneja criterios cualitativos de manera tan eficiente como AHP, ya que se centra más en comparaciones directas que en una estructura jerárquica que permita integrar múltiples niveles de análisis (Behzadian et al., 2010).

ELECTRE, por su parte, emplea un enfoque de eliminación de alternativas mediante relaciones de concordancia y discordancia (Figueira et al., 2005). Si bien es efectivo para problemas con múltiples criterios contradictorios, su uso puede volverse complejo cuando se trata de problemas con un gran número de alternativas o cuando se necesita un enfoque más intuitivo (Ćirović & Pamučar, 2022). Sin embargo, estudios recientes han demostrado que ELECTRE es una herramienta valiosa para abordar decisiones multicriterio en contextos complejos, mejorando la evaluación de alternativas en diversas aplicaciones (Taherdoost & Madanchian, 2023). A diferencia de ELECTRE, AHP es más comprensible para los tomadores de decisiones, ya que facilita la descomposición del problema en varios niveles y ofrece una mejor transparencia en el proceso de decisión (Jha & Jha, 2021). La capacidad de AHP para incorporar juicios de expertos y validar su coherencia es una de sus principales ventajas frente a métodos como PROMETHEE y ELECTRE (Carvajal Ramírez, 2023). Menciona además que esta característica es crucial en escenarios

donde se requiere una alta adaptabilidad, como la gestión de cadenas de suministro en situaciones de crisis.

El método de toma de decisiones multicriterio seleccionado fue el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), ya que la literatura revela que es el método de toma de decisiones multicriterio más frecuentemente seleccionado según la revisión de la literatura, ya que ofrece una estructura clara y flexible para la toma de decisiones, incorporando tanto datos cualitativos como cuantitativos (Forman & Gass, 2001). Al comparar este método con otros, como TOPSIS, PROMETHEE y ELECTRE, AHP se destaca por su capacidad para manejar problemas multicriterio complejos de manera más eficiente, validando la coherencia de los juicios y facilitando la toma de decisiones en situaciones donde la subjetividad juegan un papel importante (Saaty, 1988).

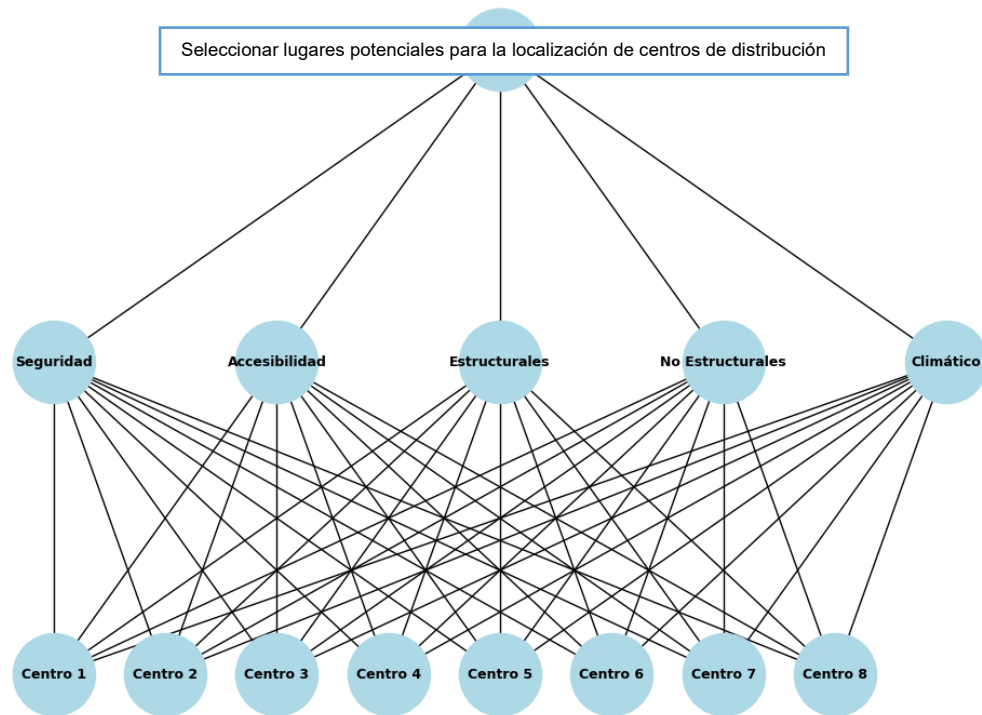
Para obtener estimaciones precisas en la toma de decisiones y minimizar la incertidumbre en la selección de criterios, es crucial consultar a expertos mencionados (Mendoza, Solano, Palencia, & García, 2019), también añaden que su conocimiento especializado y experiencia ayudan a asegurar que las decisiones se basen en evaluaciones informadas y bien fundamentadas.

Un juicio de expertos se define como una consulta de opiniones entre individuos reconocidos como autoridades confiables en un tema, técnica o habilidad particular (Meyer & Brooker, 2001 citado en Mendoza, Solano, Palencia, & García, 2019). También añade que, al realizar un proceso de toma de decisiones a menudo se torna subjetivo lo que convierte el proceso en una cuestión de juicio, donde la evaluación de alternativas y la elección final están influenciadas por la interpretación y el análisis de quienes participan.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una búsqueda de expertos para establecer un juicio sobre los criterios establecidos para la selección de centros de distribución emitidos por la Cruz Roja colombiana en el año 2008, los cuales son: seguridad,

accesibilidad, criterios estructurales, criterios no estructurales y criterios climáticos, geológicos e hidrológicos. A continuación, se presenta cada aspecto de la metodología AHP (figura 8) aplicado en el caso de estudio.

Figura 8. Diagrama de jerarquías AHP.



Fuente: Elaboración propia.

Definición del problema y objetivo: el primer paso en la aplicación de la metodología AHP es definir claramente el problema y el objetivo. En este caso, el problema es seleccionar los centros de distribución más adecuados y el objetivo es identificar aquellos centros que mejor cumplan con una serie de criterios clave.

La jerarquía de decisión se estructura en tres niveles:

1. Objetivo General: Seleccionar lugares potenciales para la localización de centros de distribución.
2. Criterios de Evaluación: Son los criterios relevantes para la selección. En este contexto, los criterios tomados en cuenta son: seguridad, accesibilidad, criterios estructurales, criterios no estructurales y criterio geológico, hidrológico y climático (Federación Internacional de la Cruz Roja, 2008).
3. Alternativas: Los centros de distribución específicos que se están evaluando. En este caso, se consideraron ocho centros de distribución.

Comparaciones pareadas de los criterios: Para determinar la importancia relativa de cada criterio, se realizaron comparaciones pareadas (Saaty, 1988). Esto implica comparar cada par de criterios y alternativas para evaluar cuál es más importante y en qué medida. Utilizamos una escala de 1 a 9 (tabla 6), donde 1 indica igual importancia y 9 indica que un criterio es extremadamente más importante que el otro.

Tabla 6. Escala de calificación Saaty

Escala de calificación Saaty
1: Igual Importancia
3: Importancia moderada de un criterio sobre otro
5: Importancia fuerte de un criterios sobre otro
7: Importancia muy fuerte de un criterio sobre otro
9: Importancia extrema de un criterio sobre otro
Valor intermedios (2, 4, 6, 8) para juicios intermedios

Fuente: Metodología AHP desarrollada por Tomás L. Saaty

Para construir la matriz de comparaciones pareadas, se realizó una búsqueda de expertos dentro del municipio pertenecientes a organizaciones no

gubernamentales, secretaria de Gestión del Riesgo, la Junta de la Defensa Civil, la Cruz Roja y el Cuerpo de Bomberos. Estos expertos fueron seleccionados por su conocimiento en la gestión de recursos y toma de decisiones estratégicas (Mendoza, Solano, Palencia, & Garcia, 2019). Posteriormente, se les aplicó una encuesta diseñada para captar sus juicios y evaluaciones sobre los diferentes criterios relevantes para el estudio con base en su experiencia y conocimiento ([anexo 2](#)). A partir de los datos obtenidos, se construyó la matriz que se presenta a continuación, la cual refleja la experiencia y las perspectivas de los expertos (tabla 7). Estas comparaciones permiten construir un modelo de toma de decisiones multicriterio más robusto, tomando en cuenta las decisiones de un grupo de expertos y el cálculo de la media geométrica de cada matriz de criterios valorada cuando los juicios no están totalmente consensuados (Toskano Hurtado, 2005).

Tabla 7. Comparación pareada de criterios establecidos.

MATRIZ FINAL CONSOLIDADA					
	Seguridad	Accesibilidad	Criterios Estructurales	Criterios No Estructurales	Criterio Geológico, Hidrológico y Climático
Seguridad	1,000	2,080	0,441	0,944	0,506
Accesibilidad	0,481	1,000	0,699	1,496	0,684
Criterios Estructurales	2,268	1,431	1,000	1,380	0,815
Criterios No Estructurales	1,059	0,668	0,725	1,000	0,320
Criterio Geológico, Hidrológico y Climático	1,974	1,461	1,227	3,129	1,000

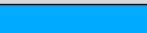
Fuente: Elaboración Propia

En esta matriz se asume que el criterio geológico, hidrológico y climático es el más importante, seguido por los criterios estructurales. La seguridad es un poco más importante que la accesibilidad. Por último, el criterio no estructural es el menos importante respecto a los demás criterios. Ahora que se dispone de la información necesaria para poner en marcha el modelo AHP, se procede a utilizar el software SuperDecisions para ejecutarlo, ya que este está diseñado para la toma de

decisiones multicriterio. Esta herramienta permite analizar y seleccionar opciones complejas considerando múltiples criterios y alternativas.

El análisis realizado en SuperDecisions ha proporcionado resultados claros y detallados sobre la selección de los centros de distribución más adecuados para la ubicación de kits de ayuda humanitaria. Estos resultados (figura 9) ofrecen una visión integral de cómo cada criterio y alternativa se desempeña en términos del vector prioridad global de las alternativas.

Figura 9. Valores normalizados de cada criterio

Inconsistency: 0.05629		
C1 Seguri~		0.16522
C2 Accesi~		0.15305
C3 Estruc~		0.24074
C4 No est~		0.12482
C5 Geológ~		0.31617

Fuente: Resultados del software SuperDecisions.

Tabla 8. Priorización ponderada de alternativas con base en los criterios establecidos.

Alternatives	Normal	Ranking
I.E. Julio Cesar Zuluaga	0.1079	5
Iglesia Salesianos	0.1760	2
Iglesia San Bartolomé	0.1819	1
Parque Jacob Oliver	0.1416	4
Polideportivo La Alameda	0.0881	6
Polideportivo Santa Rita del Rio	0.0857	7
Puesto Salud La Independencia	0.0637	8
Terminal transversal 12	0.1550	3

Fuente: Resultados del software SuperDecisions.

Los resultados del análisis AHP ([anexo 6](#)) revelaron que las cuatro alternativas para los centros de distribución de kits de ayuda humanitaria son la Iglesia San Bartolomé, Iglesia Salesianos, Terminal Transversal 12 y Parque Jacob Oliver. Estas alternativas representan el 65.46% de las prioridades ponderadas según cada

criterio, lo que destaca su relevancia a través del vector prioridad global de las alternativas que el software representa como puntaje normalizado en el proceso de selección, Este porcentaje concentra las mejores opciones, es decir, que las cuatro alternativas juntas abarcan una parte significativa de la importancia total asignada a todas las alternativas según los resultados obtenidos. Cabe agregar que los criterios son consistentes respecto a la matriz de comparación con una razón de consistencia de 0.05629 (figura 9), calculado automáticamente por el software SuperDecisions. Saaty (1988) recomienda una razón de consistencia inferior a 0.1 como aceptable para garantizar que las comparaciones sean consistentes.

Es importante resaltar que estos resultados fueron obtenidos gracias a la participación de un grupo de expertos, quienes, a través de sus conocimientos y experiencia en la evaluación de los criterios de seguridad, accesibilidad, y factores estructurales y climáticos, proporcionaron juicios fundamentales. Este enfoque garantiza que el análisis no solo se basó en datos objetivos, sino que también incorporó la experiencia profesional, añadiendo un valor significativo al proceso de toma de decisiones. Este proceso asegura una selección más precisa y confiable, lo cual refuerza la relevancia de las alternativas elegidas como los mejores lugares para el emplazamiento de los centros de distribución

Capítulo 3: Formulación del modelo matemático para la toma de decisiones.

Para la formulación del modelo matemático, se tuvieron en cuenta la selección a priori de dos medidas de desempeño. La primera se justifica en la crucial importancia del tiempo de respuesta para proporcionar asistencia de manera oportuna en situaciones de emergencia, lo cual puede ser determinante para salvar vidas y minimizar daños (Jánošíková & Žarnay, 2014). En segundo lugar, el costo total operativo se convierte en un factor esencial para garantizar la utilización eficiente y sostenible de los recursos limitados disponibles en estos contextos

(Segura, Carmona-Benitez, & Lozano, 2017). Estas dos medidas son fundamentales, pero la literatura también señala otras que son igualmente relevantes, como la minimización de distancias y costos de apertura de instalaciones (Arroyo, dos Santos Soares, & dos Santos, 2010), al igual que la capacidad de respuesta y el pre-posicionamiento de inventarios (Shu, Song, Wang, Yang, & Zhu, 2022). La inclusión de estas medidas en el análisis se basa en su relevancia práctica y en la capacidad de los modelos existentes para abordar múltiples objetivos de manera simultánea (Qi, M., Yang, Y., & Cheng, C., 2023).

Para contextualizar y respaldar la formulación del modelo matemático, a continuación, se presenta la revisión de la literatura (tabla 9). Esta revisión destaca los enfoques y metodologías utilizados en estudios previos, brindando una visión integral de las técnicas empleadas para tratar problemas similares y fortaleciendo así la base sobre la cual se sustenta el modelo propuesto.

Tabla 9. Revisión de la literatura.

Referencia	Nombre	Función Objetivo	Método de Solución
Arroyo, J. E. C., dos Santos Soares, M., & dos Santos, P. M. (2010)	A GRASP heuristic with Path-Relinking for a bi-objective p-median problem.	Minimizar simultáneamente la suma de las distancias desde cada cliente a su instalación más cercana y la suma de los costos para abrir las instalaciones, con el objetivo de encontrar un conjunto de soluciones no dominadas (Pareto-óptimas).	Utiliza la heurística GRASP para construir soluciones no dominadas y mejorarlas con búsqueda local. Además, aplica Path-Relinking para combinar soluciones y encontrar un conjunto de soluciones Pareto-óptimas. Se valida con un algoritmo de Programación Matemática, ϵ -Restrict, que resuelve el modelo con restricciones adicionales.
(Ndiaye, Ndiaye, & Ly, 2012)	Application of the p-Median Problem in School Allocation	Minimizar la distancia total entre los hogares de los alumnos y las escuelas, optimizando la ubicación de un número limitado de escuelas.	Modelo p-median aplicado a problemas de asignación escolar, resuelto mediante programación lineal entera mixta con el solucionador MILP de IBM-CPLEX, usando simulaciones para validar los resultados.
(Jánošíková & Žarnay, 2014)	Location of emergency stations as the capacitated P-median problem	Minimizar el tiempo total de viaje de ambulancias a pacientes, sujeto a la capacidad de cada estación.	Problema p-median capacitado resuelto con una matheurística que combina optimización local y un solucionador de IP, comparado con la ubicación actual usando simulación por computadora.
Escobar Iturbe, M. C., & González del Valle Campoamor, E. A. (2005)	Métodos de decisión multicriterio	Encontrar soluciones óptimas en problemas de decisión multicriterio al equilibrar y resolver conflictos entre múltiples objetivos, generando el conjunto de soluciones Pareto óptimas.	Se utilizan varios métodos para generar el conjunto eficiente de soluciones: Método de las ponderaciones, método de las restricciones y método simplex multicriterio.

Tabla 9. Revisión de la literatura (continuación)

(Karatas, Razi, & Tozan, 2017)	Una evaluación de múltiples criterios de los modelos de p-mediana, cobertura máxima y ubicación del centro p	Comparar el rendimiento de los modelos p-median, cobertura máxima y p-center en función de siete criterios de evaluación bajo requisitos de cobertura Q.	Análisis numérico de múltiples instancias del problema utilizando los tres modelos para diferentes valores de Q, con asignaciones primarias y de respaldo para evaluar las ventajas y desventajas de cada modelo.
(Segura, Carmona-Benitez, & Lozano, 2017)	Implications of the assumptions on which the p-median problem are based when distribution network design	Minimizar el costo total en la localización de centros de distribución (CD) y asignación de clientes en una red de distribución no urbana, considerando características reales de la red y costos operativos.	Modelado del problema p-median para la localización de CD y asignación de clientes, considerando costos operativos en lugar de distancias.
Abareshi y Zaferanieh (2019)	The minimum information approach to the uncapacitated p-median facility location problem.	Minimizar el costo de localización de instalaciones y servicio a demandas, sujeto a capacidades.	Modelo bi-nivel transformado en un problema no lineal de enteros mixtos usando teoría dual de Lagrange y comparando problemas lineales de enteros mixtos.
(Eligüzül & Özceylan, 2020)	Location-allocation analysis of humanitarian distribution plans: a case of United Nations Humanitarian Response Depots	Minimizar la distancia total de transporte y el costo operativo, y maximizar la cobertura de demanda en la red de distribución.	Modelos de ubicación-asignación: máxima cobertura, p-median y cubrimiento de conjunto, aplicados a datos reales del UNHRD para comparar y mejorar los planes de distribución.
Rueda-Velasco, López-Bello, Parada-Caro, Garzón-Luna, y Marroquín-Ávila (2020)	Logística para la respuesta a desastres basada en programas de asistencia social. Caso de Estudio: Riesgo de Terremoto en Bogotá-Colombia	Evaluar la integración de programas de asistencia social para la respuesta a desastres, mediante la planificación de la distribución de ayuda humanitaria y la ubicación de instalaciones en zonas seguras.	Modelado matemático táctico que considera dos estrategias: (1) distribución de última milla desde PEPs no afectados a PEPs afectados y (2) centralización de suministros en bodegas en zonas seguras para su posterior distribución. Se utilizan modelos matemáticos para evaluar capacidades y demandas de asistencia en escenarios de desastre.
Shu, J., Song, M., Wang, B., Yang, J., & Zhu, S. (2022)	Humanitarian relief network design: Responsiveness maximization and a case study of Typhoon Rammasun.	Maximizar la capacidad de respuesta del red de ayuda humanitaria, optimizando simultáneamente la ubicación de las instalaciones de ayuda, el pre-posicionamiento de inventario y la asignación de instalaciones a áreas afectadas.	Modelado mediante programación estocástica con restricciones de probabilidad, utilizando modelos aproximados para casos de información parcial y completa sobre la demanda.
Qi, M., Yang, Y., & Cheng, C. (2023).	Location and inventory pre-positioning problem under uncertainty.	Minimizar el costo total considerando la preposición de inventario y ubicación de instalaciones bajo incertidumbre, garantizando los niveles de servicio.	Enfoque de optimización robusta en dos etapas con algoritmos C&CG (generación de columnas y restricciones) para la solución exacta y un algoritmo mejorado de generación de filas para la solución aproximada.

Fuente: Elaboración propia.

La selección del modelo p-median para este estudio se fundamenta en su capacidad comprobada para abordar eficazmente los desafíos logísticos en situaciones de emergencia. Este modelo se destaca por su enfoque multiobjetivo, que permite equilibrar la reducción del tiempo de respuesta y el costo total operativo, factores que suelen estar en conflicto (Escobar Iturbe & González del Valle Campoamor, 2005). Al minimizar los tiempos de respuesta y los costos operativos, el modelo p-median optimiza la ubicación de los centros de distribución, lo que lo convierte en

una opción idónea en comparación con otros enfoques, como el modelo de cobertura máxima o el p-center, que presentan limitaciones en contextos específicos (Eligüzel & Özceylan, 2020).

Diversos estudios respaldan la eficacia del modelo p-median en la logística humanitaria. Arroyo et al. (2010) demostraron que este modelo no solo es efectivo para equilibrar la minimización de distancias y costos, sino que también se adapta bien a diferentes escenarios de respuesta a emergencias. Además, Segura et al. (2017) enfatizan que el modelo p-median puede ser especialmente útil en situaciones donde las condiciones de la red de distribución son cambiantes, facilitando la asignación óptima de recursos

Rueda-Velasco et al. (2020) también destacan la flexibilidad del modelo p-median al integrarse con diversas medidas de desempeño, lo que permite su aplicación en una amplia gama de contextos humanitarios. Además, añade que este enfoque es crucial, ya que los requisitos de las operaciones de ayuda pueden variar significativamente según la naturaleza del desastre y la geografía afectada. Asimismo, la capacidad del modelo p-median para equilibrar la proximidad a la demanda con la capacidad de los centros de distribución facilita una distribución más eficiente de los recursos (Daskin, 2013). Esta capacidad de gestión de la logística, en conjunción con el enfoque de minimización de costos, permite una respuesta más efectiva a las crisis, lo que ha sido validado por múltiples estudios en la literatura (Karatas, Razi, & Tozan, 2017).

La elección del método de ponderaciones se justifica por su capacidad para manejar múltiples objetivos simultáneamente. Este enfoque permite combinar diversos criterios en una única función objetivo, lo que es particularmente útil para equilibrar factores como la minimización del tiempo de respuesta y la reducción de costos (Escobar Iturbe & González del Valle Campoamor, 2005). El método de ponderaciones, propuesto por Zadeh en 1963, se adapta a problemas tanto lineales

como no lineales, facilitando la integración de múltiples objetivos en la toma de decisiones (Pliego Martínez, 2012).

Para determinar los pesos de cada coeficiente de ponderación, se utilizará el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Este método permite estructurar problemas complejos en una jerarquía y asignar pesos basados en comparaciones pareadas, asegurando que las soluciones reflejen las prioridades clave del problema (Saaty, 1988). La elección del AHP se ve respaldada por la afirmación de Regis Hernández et al. (2017) sobre su flexibilidad y capacidad para manejar juicios imprecisos de los expertos, lo que resulta esencial en un contexto donde la información puede ser limitada o incierta.

Los expertos que participaron en el proceso de comparación pareada se centraron en las dos principales funciones del modelo: minimizar el tiempo de respuesta y minimizar los costos de operación. Esta comparación no solo facilitará la derivación de pesos basados en la importancia relativa de cada criterio, sino que también permitirá que las decisiones reflejen las prioridades establecidas en la literatura (Escobar Iturbe & González del Valle Campoamor, 2005)

De acuerdo con la metodología para la toma de decisiones multicriterio AHP aplicada con anterioridad a los expertos para la selección de los criterios más relevantes para la selección de centros de distribución, la estructura del nuevo proceso se reforma de la siguiente manera:

1. Objetivo: seleccionar el peso adecuado para las funciones de minimización de tiempo de respuesta y costos operativos implicados en la atención.
2. Criterios de Evaluación: Minimización de tiempo de respuesta y costos operativos implicados en la atención

3. Alternativas: Coeficientes de ponderación λ_1 y λ_2

Los resultados obtenidos a través del proceso AHP ([anexo 8](#)) proporcionan una clara priorización entre los dos objetivos evaluados: minimizar el tiempo de respuesta y minimizar los costos operativos. La matriz de comparación pareada consolidada (tabla 10), basada en los juicios de los cinco expertos, revela que la importancia relativa de minimizar el tiempo de respuesta se valoró en 8, mientras que la minimización de los costos operativos se valoró en 1/8, estos valores reflejan que la rapidez en la entrega de los kits de ayuda humanitaria es significativamente más crucial que la reducción de costos operativos. Dado que no hubo consenso entre los expertos, se recurrió al uso de la media geométrica para calcular la matriz final ([anexo 9](#)), asegurando una representación justa de las diferentes opiniones y ponderaciones en el proceso de decisión.

Tabla 10. Matriz final consolidada (tiempo de respuesta vs costo)

	Min Tiempo respuesta	Min Costo
Min Tiempo respuesta	1	8
Min Costo	1/8	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Priorización ponderada de alternativas (coeficientes de ponderación)

Alternativas	Normal	Ranking
Funcion 1	0.8889	1
Funcion 2	0.1111	2

Fuente: Resultados del software SuperDecisions.

La priorización ponderada de los coeficientes en base a la función uno y dos (tabla 11) señala que el peso asignado a la minimización del tiempo de respuesta es 0.8889 (λ_1), mientras que el peso para la minimización de los costos operativos es 0.1111 (λ_2). Estos pesos reflejan directamente la importancia de cada objetivo en el proceso de toma de decisiones, con un énfasis predominante en la eficiencia temporal sobre la eficiencia de costos. Los resultados de la metodología AHP aseguran que el modelo multiobjetivo esté alineado con las y fundamentado en la

opinión de un grupo de expertos proporcionando una base sólida para la integración de estos pesos en el análisis de localización de centros de distribución.

Formulación del modelo matemático:

A través de la formulación del modelo, se ha desarrollado una estructura matemática que permite optimizar la asignación de albergues a centros de distribución, minimizando el costo y el tiempo de respuesta, considerando las restricciones operativas y logísticas. Este modelo no solo busca la efectividad en la distribución de recursos minimizando el tiempo de respuesta, sino que también introduce elementos como el costo fijo de apertura de los centros, el costo de mantener inventario en los centros y la capacidad para almacenar el inventario. Inicialmente, es esencial considerar los supuestos ya que estos definen las condiciones bajo las cuales el modelo opera y limitan el análisis a un conjunto específico de circunstancias. A continuación, se detallan estos supuestos, que proporcionan el contexto necesario para interpretar los resultados y comprender las implicaciones del modelo en el contexto geográfico particular.

Supuestos:

- Demanda de kits de ayuda humanitaria y tiempos de desplazamiento: la demanda de kits se considera por familias en cada albergue y los tiempos de transporte entre los albergues y los centros de distribución (CEDIS) son conocidos y se consideran determinísticos.
- Capacidad de los CEDIS: todos los centros de distribución tienen una capacidad para almacenar el inventario necesario para satisfacer la demanda de los albergues asignados. Cada CEDI tiene una capacidad en términos de familias de kits, que no debe ser superada por el inventario pre-posicionado.

- Inventario pre-Posicionado: el inventario puede ser pre-posicionado en los centros de distribución antes de que ocurra la demanda. El inventario es fijo y conocido y se distribuye entre los albergues en función de la demanda.
- Costo fijo de apertura: se considera un costo fijo para la apertura de cada CEDI. Este costo es independiente de la cantidad de inventario manejado o la cantidad de albergues asignados al CEDI.
- Asignación de Demanda: no se permite la división de la demanda de un albergue entre múltiples centros de distribución. Cada albergue debe ser asignado a un único CEDI.
- Número máximo de CEDIS abiertos: el límite de centros de distribución abiertos (p) se establece para controlar el costo total y la asignación de albergues a los respectivos CEDIS.
- Cobertura total de la demanda: la cobertura total de la demanda debe ser garantizada por los CEDIS abiertos. Cada demanda debe ser completamente satisfecha por los CEDIS seleccionados.
- Costo de mantenimiento del inventario: El costo de mantener el inventario en cada CEDI es considerado y se calcula en función del costo de mantenimiento por unidad de inventario. Este costo es proporcional a la cantidad de inventario pre-posicionado en cada CEDI.
- No consideración de costos de transporte: El modelo no considera los costos asociados con el transporte de los kits entre los CEDIS y los albergues. Solo se consideran los tiempos de desplazamiento entre los CEDIS potenciales y albergues, no su valor monetario, dado que este se considera en la función

objetivo que concierne a la minimización del tiempo total de respuesta o desplazamiento.

- **Modelo estático:** el modelo es estático, es decir, no se tienen en cuenta variaciones en la demanda o en la capacidad de los centros de distribución a lo largo del tiempo u horizonte de planificación. En la logística humanitaria, el horizonte de planificación en la fase de preparación varía dependiendo del tipo de desastre y los objetivos de la operación, pudiendo extenderse desde meses hasta varios años (Galindo & Batta, 2013). Este periodo permite realizar una adecuada identificación de riesgos, la preposición de recursos y la optimización de rutas de distribución, asegurando una respuesta más eficaz y oportuna cuando ocurra el evento Kovács & Spens, 2007).

Conjuntos:

I : Conjunto de albergues, $i \in I$, donde $I = \{1, 2, \dots, n\}$

J : Conjunto de CEDIS, $j \in J$, donde $J = \{1, 2, \dots, m\}$

Parámetros:

- t_{ij} : Tiempo entre el albergue i y el CEDI j .
- h_i : Demanda del albergue i en términos de familias de kits.
- k_j : Capacidad del CEDI j . En términos de familias de kits.
- f_j : Costo fijo de abrir el CEDI j
- c_j : Costo de mantenimiento por unidad de inventario en el CEDI j
- p : Número máximo de CEDIS que pueden abrirse.
- $\lambda_1 \lambda_2$: Coeficientes de ponderación

Variables de decisión:

- x_{ij} : Variable binaria que indica si el albergue i es asignado al CEDI j .
- y_j : Variable binaria que indica si el CEDI j está abierto.
- q_j : Cantidad de inventario pre-posicionado en el CEDI j

Función objetivo ponderada:

$$\text{Minimizar } Z = \lambda_1 \cdot Z_1(s) + \lambda_2 \cdot Z_2(s) \quad (1)$$

Donde:

$$Z_1(s) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

$$Z_2(s) = \sum_{j=1}^m (f_j y_j + c_j q_j) \quad (3)$$

Restricciones:

- Cada albergue debe ser asignado a exactamente un CEDI:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (4)$$

- Cada CEDI abierto debe tener al menos un albergue asignado:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq y_j, \quad \forall j \in J \quad (5)$$

- Un albergue solo se puede asignar a los centros de distribución abiertos:

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

- Número máximo de CEDIS que pueden abrirse:

$$\sum_{j=1}^m y_j \leq p \quad (7)$$

- La demanda total asignada a cada CEDI no debe exceder su inventario pre-posicionado.

$$\sum_{i=1}^n h_i x_{ij} \leq q_j, \quad \forall j \in J \quad (8)$$

- La cantidad de inventario en cada CEDI no debe exceder su capacidad.

$$q_j \leq k_j, \quad \forall j \in J \quad (9)$$

- No negatividad:

$$q_j \geq 0, \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (11)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (12)$$

La función objetivo (1) busca reducir el tiempo total de transporte entre los albergues y los CEDIS, así como los costos operativos asociados. La función (2) se centra en el tiempo total de transporte, mientras que (3) abarca los costos fijos de apertura y el costo de mantenimiento del inventario en los CEDIS. Para cumplir con los objetivos del modelo, se deben observar varias restricciones:

(4) cada albergue debe ser asignado a exactamente un CEDI, (5) cada CEDI abierto debe tener al menos un albergue asignado, (6) un albergue solo puede ser asignado a los CEDIS que están abiertos, (7) el número total de CEDIS abiertos no puede exceder un límite máximo, (8) la demanda total asignada a cada CEDI no debe superar el inventario pre-posicionado, (9) la cantidad de inventario en cada CEDI no debe exceder su capacidad máxima, y (10) el inventario debe ser no negativo mientras que las variables de decisión deben ser binarias (11) y (12). Estas restricciones aseguran una asignación efectiva y una operación dentro de los parámetros definidos.

Este modelo permite no solo optimizar la localización de los centros de distribución y la asignación de albergues, sino también gestionar de manera efectiva el inventario pre-posicionado y asegurar que las capacidades de los centros de distribución se respeten, minimizando el tiempo de respuesta y los costos asociados a la operatividad en la atención al desastre.

Los parámetros y datos de entrada son fundamentales para la correcta formulación y solución del problema. Estos incluyen el tiempo de transporte t_{ij} entre cada albergue i y el CEDI j , la demanda h_i de kits en cada albergue i , la capacidad k_j de cada CEDI j , el costo fijo f_j asociado con la apertura de cada CEDI, y el costo de mantenimiento por unidad de inventario c_j en cada CEDI. Estos valores son esenciales para definir el modelo de localización y asignación de recursos, y se basan en datos recolectados y procesados para garantizar que el modelo refleje adecuadamente la realidad del sistema de distribución de ayuda humanitaria. La precisión de estos datos influye directamente en la efectividad y viabilidad de las soluciones generadas por el modelo, a continuación, se define cada parámetro:

Tiempo de transporte t_{ij} : El tiempo de transporte entre cada albergue y centro de distribución (tabla 12) se obtuvo dividiendo la distancia euclidiana en kilómetros, calculada con la herramienta de medición de distancia de Google Maps ([anexo 7](#)), por el límite de velocidad máximo permitido en la ciudad o municipio. Para estos cálculos, se utilizó el límite de velocidad de 60 km/h para vías urbanas, según lo establecido en la Ley 769 de 2002 del Ministerio de Transporte.

Tabla 12. Tiempo de transporte en horas (distancia/ velocidad).

ALBERGUE / CEDI	TIEMPO DE TRANSPORTE (Minutos)			
	Iglesia Salesianos	Iglesia San Bartolomé	Terminal transversal 12	Parque industrial Jacob Oliver
Coliseo de ferias Manuel Victoria Rojas	2,320	1,640	1,030	1,030
Colegio Salesiano San Juan Bosco	0,020	0,830	3,240	1,580
Coliseo Benicio Echeverry	1,050	1,840	4,300	3,640
Estadio Doce de Octubre	0,460	1,190	3,710	1,410
Institución Educativa Aguaclara	3,290	2,450	2,100	4,810
Institución Educativa Técnica Occidente	2,750	2,120	3,590	4,250
Parque Julia Escarpeta	0,310	1,120	3,390	1,260
Institución Educativa Julia Restrepo	0,990	0,750	2,270	2,230
Institución Educativa Gimnasio del Pacífico	0,830	1,220	2,860	1,550

Fuente: Elaboración propia.

Demanda h_i de kits en cada albergue i : en un evento de desastre, los albergues con mayor capacidad tienden a recibir más personas, lo que se traduce en una mayor demanda de kits de ayuda humanitaria. La selección de estos sitios establecidos como albergues se basó en una revisión de campo con apoyo de la comunidad cercana a cada albergue, tomando en cuenta no solo la capacidad de cada uno, sino también su proximidad a áreas de alto riesgo, descritas en los mapas de riesgos del Plan de Ordenamiento Territorial (POT, 2014). De este modo, se asigna una mayor demanda a los albergues ubicados en zonas más vulnerables, ya que estas áreas son más propensas a inundaciones u otros desastres naturales. Los datos históricos sobre el número de personas afectadas en eventos anteriores, en los consolidados de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) publicados en su sitio web, permite distribuir la demanda de kits de manera proporcional según la gravedad o recurrencia de los desastres en ciertas zonas. Sin embargo, al no contar con información específica, se distribuyó la demanda uniformemente entre los albergues, realizando pequeños ajustes con base en factores como la accesibilidad del albergue o su cercanía a las áreas más afectadas según la información proporcionada por el Plan de Ordenamiento Territorial sobre los lugares con mayor riesgo de inundación (POT, 2014).

El parámetro de demanda (tabla 13) se examina con robustez mediante la creación de varios escenarios de distribución, basados en diferentes suposiciones. Esta metodología permite evaluar cómo varía la demanda de kits bajo distintas condiciones y supuestos, asegurando una planificación más precisa y adaptable.

Tabla 13. Demanda en términos de kit por familia

Demanda de kits de ayuda humanitaria	
Albergues temporales	Kits
Coliseo de ferias Manuel Victoria Rojas	200
Colegio Salesiano San Juan Bosco	40
Coliseo Benicio Echeverry	100
Estadio Doce de Octubre	140
Institución Educativa Aguaclara	80
Institución Educativa Técnica Occidente	75
Parque Julia Escarpeta	35
Institución Educativa Julia Restrepo	60
Institución Educativa Gimnasio del Pacífico	110

Fuente: Elaboración propia.

Capacidad k_j : La capacidad de los centros de distribución (tabla 14) se ha evaluado considerando la infraestructura física y operativa disponible a partir de la revisión en campo, asumiendo que esta capacidad es fija bajo las condiciones actuales.

Tabla 14. Capacidad de cada CEDI

Capacidad ajustada según proyección de demanda	
Centros de distribución de ayudas	Kits
Iglesia Salesianos	500
Iglesia San Bartolomé	600
Terminal transversal 12	650
Parque industrial Jacob Oliver	700

Fuente: Elaboración propia.

Costo fijo de apertura de un CEDI f_j y de mantener inventario pre-posicionado c_j : Para calcular los costos operativos de los CEDIS, se realizó una investigación exhaustiva sobre las tarifas de energía, agua y los costos administrativos del personal, cabe resaltar que el alquiler no se consideró en el cálculo de costos debido a que los centros de distribución se asumen como instalaciones excepto el parque industrial son de propiedad pública o de uso comunitario, lo cual elimina la necesidad de incluir costos de arrendamiento en el análisis. El consumo energético se estimó considerando un nivel de tensión de media tensión (NT 1 Propiedad OR), adecuado para la operación intensiva de los CEDIS en situaciones de emergencia. Se aplicó el CU Franjas Media para reflejar el uso extendido y las horas de mayor demanda teniendo en cuenta las tarifas vigentes establecidas por la empresa de energía CELSIA S.A ([anexo 3](#)). Los costos fueron ajustados según el estrato socioeconómico de cada ubicación, utilizando el documento de estratificación socioeconómica de Tuluá del año 2018. (Alcaldía de Tuluá, 2018)

El cálculo del costo del agua se basó en la formulación de acuerdo con las tarifas de consumo actuales emitidas por CentroAguas ([anexo 4](#)). Sin embargo, para el modelo, se ajustaron las unidades de consumo para reflejar el mayor uso inicial asociado a la operación intensiva de los CEDIS. Se asumieron consumos de 100 m³ para las iglesias, 300 m³ para el colegio, y 600 m³ para el parque industrial. Estos ajustes permiten que los costos estimados reflejen adecuadamente el uso intensivo y continuo de agua necesario para la gestión y operación de los centros.

En cuanto al personal administrativo, se consultaron diversas fuentes, incluyendo reportes en línea y documentación de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), para obtener rangos salariales representativos. Estos rangos incluyen jefe de CEDI, Administrativo, Contador y Recepcionista, y se consolidaron para ofrecer una estimación realista de los costos salariales. Para el servicio de internet, se utilizaron tarifas promedio de proveedores de telecomunicaciones que garantizan la conectividad necesaria para la operación de

los CEDIS. Estos métodos aseguran que los costos reflejen adecuadamente las necesidades operativas y el contexto específico de cada centro.

Para calcular el costo de mantener inventario, se utilizaron los valores de apertura ya que los costos asociados al inicio de las operaciones reflejan de manera precisa los costos recurrentes en el almacenamiento de inventario (tabla 15). Esta aproximación se basa en la premisa de que los costos de apertura son representativos de los costos operativos como lo es mantener el inventario pre posicionado, ya que ambos se derivan de necesidades similares de infraestructura y logística. Además, esta metodología permite una estimación consistente y práctica al utilizar los mismos valores de referencia para ambas fases del modelo. Un factor para resaltar es que para calcular el costo de mantener inventario por unidad se toman en cuenta los costos operativos de apertura y se dividen entre la capacidad de cada centro de distribución, luego ese valor se divide entre mil para que normalizarlo respecto al tiempo, ya que el costo representa un valor muy alto, lo que anula sensibilidad y visibilidad a los resultados. A continuación, se presentan los costos asociados a la apertura y operación:

Tabla 15. Costo fijo de apertura y mantenimiento de inventario pre-posicionado

Componente	Costo unitario
Energía (por 10,000 kWh)	\$ 6.953.800
Internet (Plan avanzado)	\$ 300.000
Nómina	\$ 12.000.000
Agua (general: Cargo fijo + Consumo mensual $\times 4,909.54 \text{ COP/m}^3$)	(Varía por centro)

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, el capítulo de formulación e implementación del modelo ha establecido los parámetros necesarios, incluyendo la definición de variables, funciones objetivo y restricciones, así como la asignación de pesos de ponderación. Estos elementos

son cruciales para la precisión del modelo en la localización de centros de distribución y el pre-posicionamiento de inventario. El próximo capítulo se dedicará al análisis de resultados y la discusión de escenarios para evaluar la efectividad del modelo en distintas condiciones.

Capítulo 4: Presentación de análisis de resultados y escenarios

Para asegurar una planificación robusta y adaptable, se han desarrollado varios escenarios iniciales validados que varían diversos parámetros para dar consistencia a los resultados.

El modelo se desarrolló utilizando técnicas de programación lineal entera-mixta. Para la formulación y solución del problema, se utilizó la librería Pulp, una biblioteca de optimización para Python que facilita la implementación de modelos de optimización lineal y entrera-mixta. El desarrollo del modelo se llevó a cabo en Google Colab, ya que este entorno de desarrollo basado en la nube integra Python, permitiendo ejecutar el código ([anexo 5](#)) de manera interactiva. Esta plataforma facilitó la implementación eficiente del modelo y la experimentación con diferentes configuraciones y parámetros. Así, se logró obtener asignaciones optimizadas que disminuyen el costo asociado a la apertura de los centros de distribución de kits de ayuda y el mantenimiento de inventario pre-posicionado además de minimizar el tiempo de respuesta entre los albergues y los centros de distribución seleccionados (figura 10), asegurando una respuesta eficaz ante situaciones de emergencia en el municipio de Tuluá. Los resultados del modelo se sintetizan de la siguiente manera:

Figura 10. Resultados del modelo desarrollado en Google Colab utilizando Pulp en Python.

Parámetro				Resultado	
λ_1	0,8889	λ_2	0,1111	Tiempo	Costo
				10,34 min	\$ 4.327.320,86

CEDI	Estado	Albergues Asignados
Iglesia Salesianos	Abierto	Coliseo Benicio Echeverry, Estadio Doce de Octubre
Terminal transversal 12	Cerrado	
Iglesia San Bartolomé	Abierto	Colegio Salesiano San Juan Bosco, Institución Educativa Aguacalara, Institución Educativa Técnica Occidente, Parque Julia Escarpeta Coliseo de Ferias Manuel Victoria Rojas, Institución Educativa Julia Restrepo, Institución Educativa Gimnasio del Pacífico
Parque Industrial Jacob Oliver	Cerrado	-

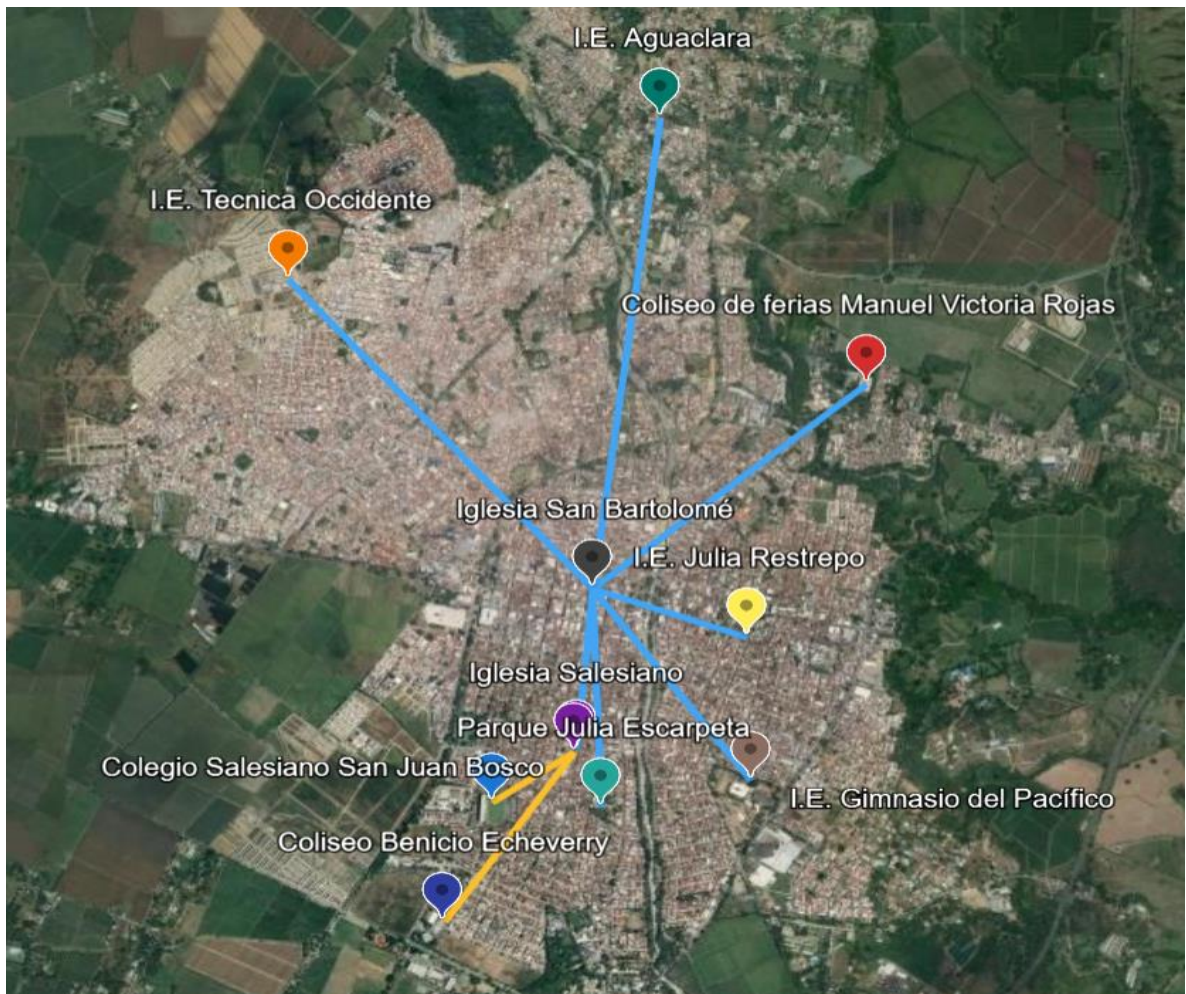
Inventario Pre-posicionado (Kits)	Cantidad
Iglesia Salesianos	240
Terminal Transversal 12	600
Iglesia San Bartolomé	0
Parque Industrial Jacob Oliver	0

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de respuesta calculado es de aproximadamente 10.34 minutos, indicando el tiempo promedio para que un albergue reciba ayuda desde el centro de distribución asignado. Los costos operativos totales ascienden a aproximadamente 4,327,320.86 unidades monetarias, reflejando los costos asociados con la apertura y mantenimiento de los centros de distribución. El valor del costo también se debe a que el coeficiente de ponderación es relativamente bajo, por lo que el costo es

directamente proporcional, además los resultados indican que se han abierto dos centros de distribución (CEDIS), específicamente Iglesia Salesianos e Iglesia San Bartolomé. Estos centros han sido asignados estratégicamente para minimizar los tiempos de respuesta ante una posible emergencia (figura 11). El CEDI Iglesia Salesianos cubre dos albergues, mientras que Iglesia San Bartolomé atiende a siete albergues, distribuyendo eficientemente la demanda de kits de emergencia. Los centros restantes, Terminal transversal y Parque industrial Jacob Oliver, permanecen cerrados, ya que no son necesarios para optimizar los tiempos de respuesta en este escenario.

Figura 11. Representación geoespacial de los resultados sobre la asignación de albergues a los CEDIS



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al inventario pre-posicionado, Iglesia Salesianos cuenta con 240 kits y Terminal transversal 12 con 600 kits. Esta distribución se realiza en función de los pesos dados por los expertos: $\lambda_1 = 0.8889$ para minimizar los tiempos de respuesta y $\lambda_2 = 0.1111$ para los costos asociados a la apertura y mantenimiento de inventarios.

Estos pesos reflejan la prioridad del modelo en reducir los tiempos de respuesta sin descuidar los costos operativos.

Análisis de escenarios

Escenario 1: En el escenario uno, se varían los pesos de ponderación λ_1 y λ_2 para evaluar cómo modificar la importancia relativa entre los tiempos de respuesta y los costos afecta la solución del modelo. Ajustar estos pesos permite analizar dos aspectos. El primer aspecto a evaluar consiste en priorizar completamente la minimización del tiempo de respuesta, es decir, dar un peso de 1 (uno) a la primera función de desempeño y a la segunda un peso de 0 (cero), El segundo consiste en enfocarse exclusivamente en la minimización de los costos, es decir, se otorga un peso de 1 (uno) a la segunda función de desempeño y la primera un peso de 0 (cero). Estos enfoques proporcionan una visión clara de cómo cambiar la prioridad entre estos dos objetivos impacta en la asignación de albergues a centros de distribución y el inventario pre-posicionado. A continuación, se presentan los resultados obtenidos (figura 12):

Figura 12. Resultados del escenario 1 modificando el valor de los coeficientes de ponderación.

Parámetro				Resultado	
λ_1	1	λ_2	0	Tiempo	Costo
				8,67 min	\$ -

CEDI	Estado	Albergues Asignados
Iglesia Salesianos	Abierto	Colegio Salesiano San Juan Bosco, Coliseo Benicio Echeverry, Estadio Doce de Octubre, Parque Julia Escarpeta, Institución Educativa Gimnasio del Pacífico
Terminal transversal 12	Abierto	Institución Educativa Técnica Occidente, Institución Educativa Julia Restrepo
Iglesia San Bartolomé	Abierto	Institución Educativa Aguaclara
Parque Industrial Jacob Oliver	Abierto	Coliseo de ferias Manuel Victoria Rojas

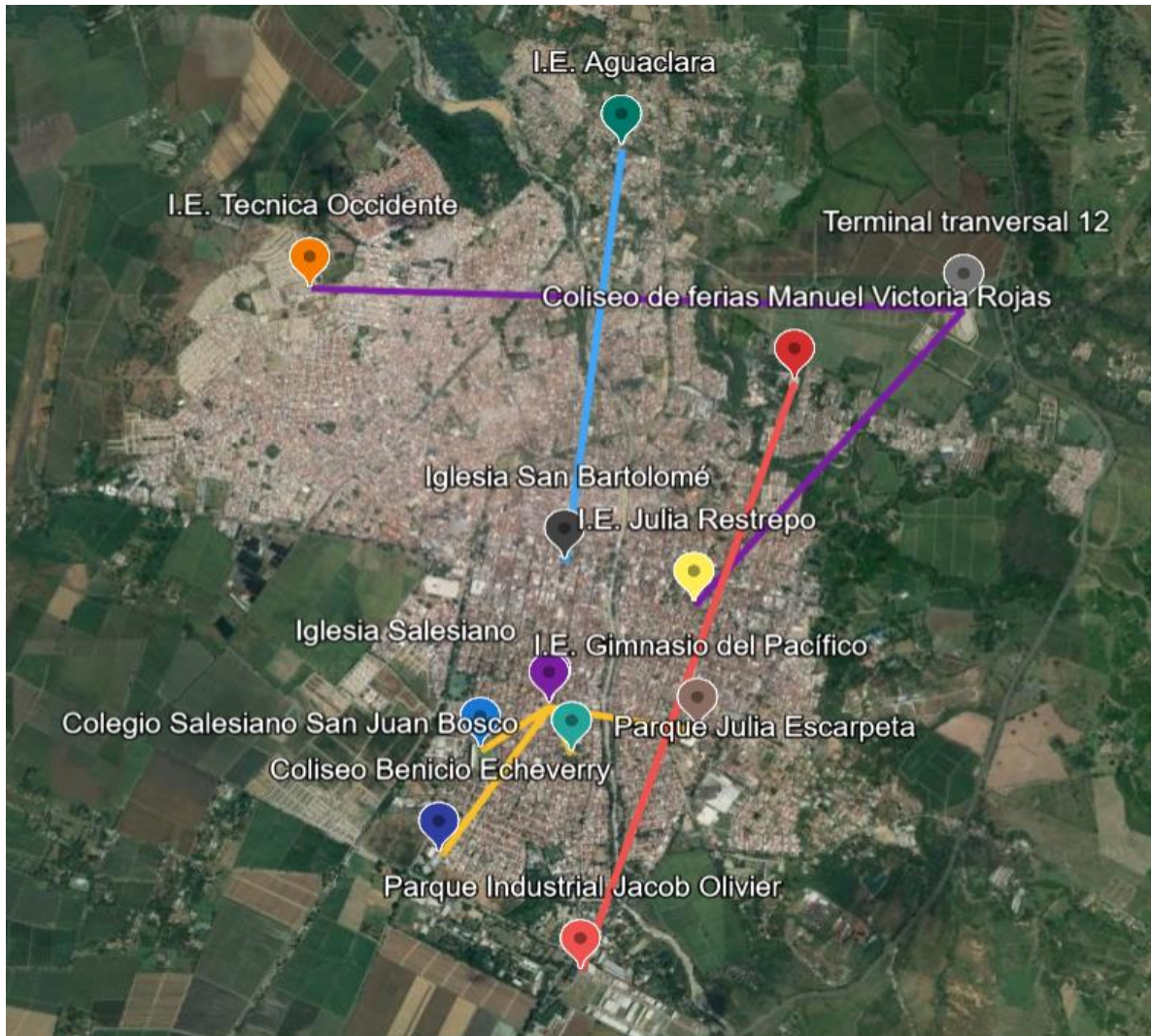
Inventario Pre-posicionado (Kits)	Cantidad
Iglesia Salesianos	425
Terminal Transversal 12	135
Iglesia San Bartolomé	80
Parque Industrial Jacob Oliver	200

Fuente: Elaboración propia

Cuando los valores de los criterios de ponderación se establecen en $\lambda_1 = 1$ y $\lambda_2 = 0$, el tiempo de respuesta es de aproximadamente 8.67 minutos y los costos operativos reflejan un valor de 0, esto se debe a se prioriza totalmente el tiempo de respuesta, por lo que resulta razonable que se abran varios centros. A continuación, se presenta la asignación de cada albergue a cada centro de distribución desde su ubicación geoespacial (figura 13), posteriormente, se presentan los resultados

variando los valores de los coeficientes de ponderación (figura 14) en $\lambda_1 = 0$ y $\lambda_2 = 1$.

Figura 13. Representación geoespacial de los resultados escenario 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Resultados del escenario 1 modificando el valor de los coeficientes de ponderación.

Parámetro				Resultado	
λ_1	0	λ_2	1	Tiempo	Costo
				-	\$ 38.949.782,74

CEDI	Estado	Albergues Asignados
Iglesia Salesianos	Abierto	Colegio Salesiano San Juan Bosco, Estadio Doce de Octubre, Institución Educativa Julia Restrepo
Terminal transversal 12	Abierto	Coliseo de ferias Manuel victoria, Bosco, Coliseo Benicio Echeverry, Institución Educativa Aguaclara, Institución Educativa Técnica de Occidente, Parque Julia Escarpeta, Institución Educativa Gimnasio del Pacífico
Iglesia San Bartolomé	Cerrado	-
Parque Industrial Jacob Oliver	Cerrado	-

Inventario Pre-posicionado (Kits)	Cantidad
Iglesia Salesianos	240
Terminal Transversal 12	600
Iglesia San Bartolomé	0
Parque Industrial Jacob Oliver	0

Fuente: Elaboración propia

En este caso el resultado en la asignación es semejante al modelo principal, con la única diferencia de que a la Iglesia Salesianos tiene asignado el albergue Colegio Salesiano San Juan Bosco. La selección de estos dos centros de distribución se debe a que asumen los menores costos de mantenimiento de inventario.

Escenario 2: En este escenario, se modificaron las capacidades de los centros de distribución para evaluar cómo estas variaciones afectan la asignación de albergues y la eficiencia del modelo. La capacidad del CEDI Terminal transversal 12 se redujo

a 400 kits, Iglesia Salesianos a 300 kits, Parque Industrial Jacob Oliver a 100 kits y por último Iglesia San Bartolomé a 150, lo que permite observar la flexibilidad y la adaptabilidad del modelo ante cambios en la capacidad de los centros de distribución. El ajuste en las capacidades influye en la asignación de albergues y en la distribución del inventario, reflejando la importancia de ajustar las capacidades para optimizar el tiempo de respuesta y la cobertura. Estos cambios permiten analizar la robustez del modelo y cómo la variabilidad en las capacidades puede impactar la solución óptima. Los resultados obtenidos se describen en la figura 15.

Figura 15. Resultados del escenario 2 capacidad de centros de distribución.

Parámetro				Resultado	
λ_1	0,8889	λ_2	0,1111	Tiempo	Costo
				15,16 min	\$ 6.601.722,63

CEDI	Estado	Albergues Asignados
Iglesia Salesianos	Abierto	Institución Educativa Aguacalara, Institución Educativa Técnica Occidente, Parque Julia Escarpeta, Institución Educativa Gimnasio del Pacífico
Terminal transversal 12	Abierto	Coliseo de ferias Manuel victoria, Estadio Doce de Octubre, Institución Educativa Julia Restrepo
Iglesia San Bartolomé	Abierto	Colegio Salesiano San Juan Bosco, Coliseo Benicio Echeverry
Parque Industrial	Cerrado	-

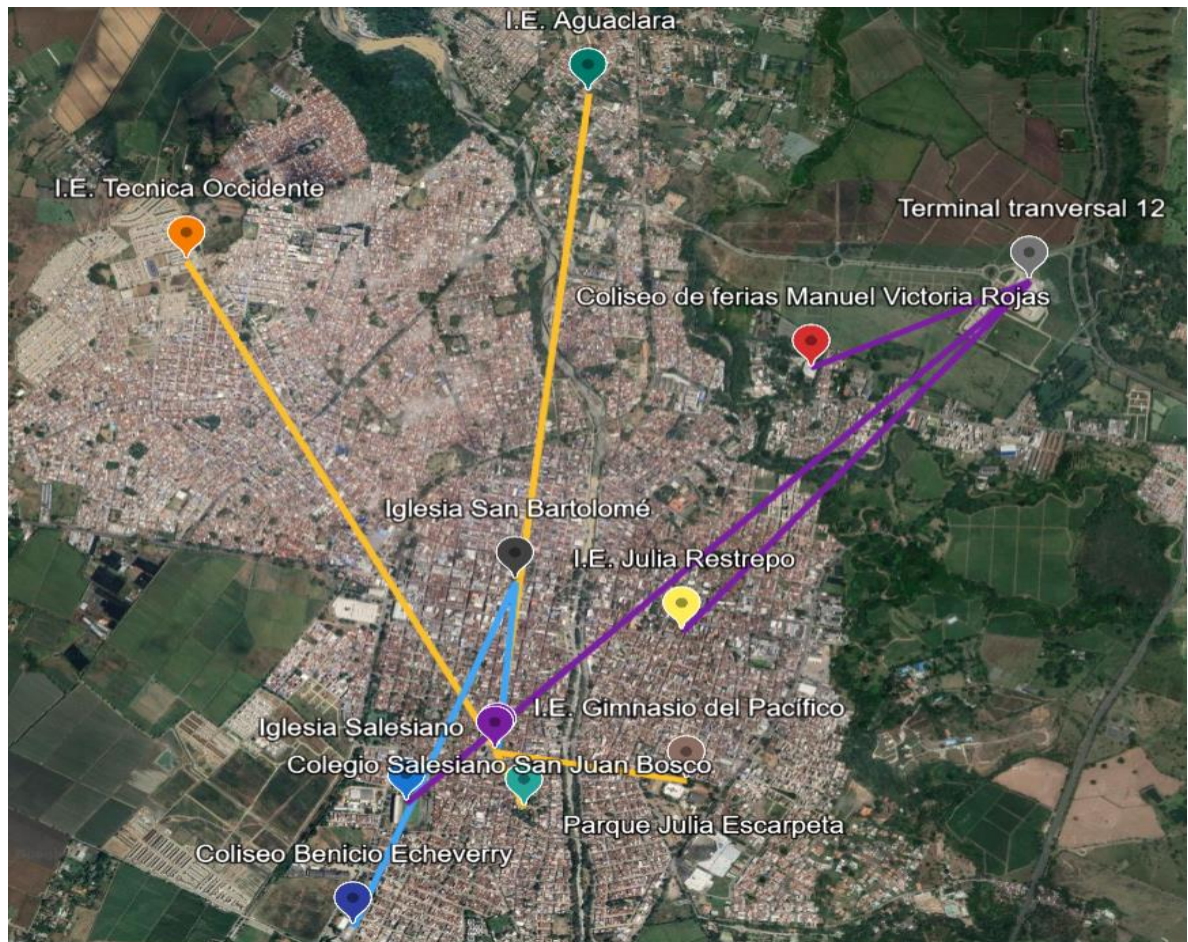
Inventario Pre-posicionado (Kits)	Cantidad
Iglesia Salesianos	300
Terminal Transversal 12	140
Iglesia San Bartolomé	400
Parque Industrial Jacob Oliver	0

Fuente: Elaboración propia

En el segundo escenario, al variar la capacidad de los centros de distribución, se obtuvo resultados diferentes en cuanto al tiempo de respuesta y los costos

operativos. El tiempo de respuesta calculado fue de 15.17 minutos, mientras que los costos operativos ascendieron a 6,601,722.63 unidades monetarias. Este aumento en los costos se atribuye principalmente a los cambios en la capacidad de los centros de distribución, lo que impactó directamente los costos fijos de apertura y mantenimiento. En este escenario, las asignaciones se distribuyen en tres centros de distribución Iglesia Salesiano, Terminal transversal 12 e Iglesia San Bartolomé (figura 16).

Figura 16. Representación geoespacial de los resultados escenario 2.



Fuente: Elaboración propia

Al comparar estos resultados con los del modelo principal, se observó que el tiempo de respuesta en el modelo original fue de 10.34 minutos, considerablemente más

bajo que en el escenario modificado, lo que indica una respuesta más eficiente en ese caso. Los costos operativos en el modelo principal también fueron más bajos, alrededor de 4,327,320.86 unidades monetarias, lo que demuestra una mayor eficiencia en términos de costos. Esto se debe, en parte, a que en el modelo original se abrieron dos CEDIS: Iglesia Salesianos e Iglesia San Bartolomé, permitiendo una mejor distribución de la demanda de kits de emergencia entre los albergues y optimizando tanto los costos como los tiempos de respuesta. Además, el inventario pre-posicionado fue distribuido de manera más eficiente en el modelo principal, con 240 kits en Iglesia Salesianos y 600 kits en Terminal Transversal 12, mientras que, en el escenario modificado, el inventario en Iglesia Salesianos aumentó a 300 kits, lo que incrementó los costos operativos debido a la mayor capacidad.

Escenario 3: Se realizaron variaciones en las demandas de los albergues con el objetivo de examinar la adaptabilidad del modelo a cambios en las necesidades. Ajustar los parámetros de demanda permite evaluar la capacidad del sistema para manejar fluctuaciones en la carga de trabajo y cómo estas variaciones influyen en la asignación de albergues a centros de distribución. Estos resultados (figura 17) proporcionan una comprensión más detallada de la flexibilidad del modelo.

Figura 17. Resultados del escenario 3 demanda de ayuda humanitaria.

Parámetro				Resultado	
λ_1	0,8889	λ_2	0,1111	Tiempo	Costo
				15,16 min	\$ 6.601.722,63

CEDI	Estado	Albergues Asignados
Iglesia Salesianos	Abierto	Colegio Salesiano San Juan Bosco, Estadio Doce de Octubre, Parque Julia Escarpeta, Institución Educativa Julia Restrepo
Terminal transversal 12	Cerrado	
Iglesia San Bartolomé	Abierto	Coliseo de ferias Manuel victoria, Coliseo Benicio Echeverry, Institución Educativa Aguacalara, Institución Educativa Técnica Occidente, Institución Educativa Gimnasio del Pacífico
Parque Industrial Jacob Oliver	Cerrado	-

Inventario Pre-posicionado (Kits)	Cantidad
Iglesia Salesianos	350
Terminal Transversal 12	600
Iglesia San Bartolomé	0
Parque Industrial Jacob Oliver	0

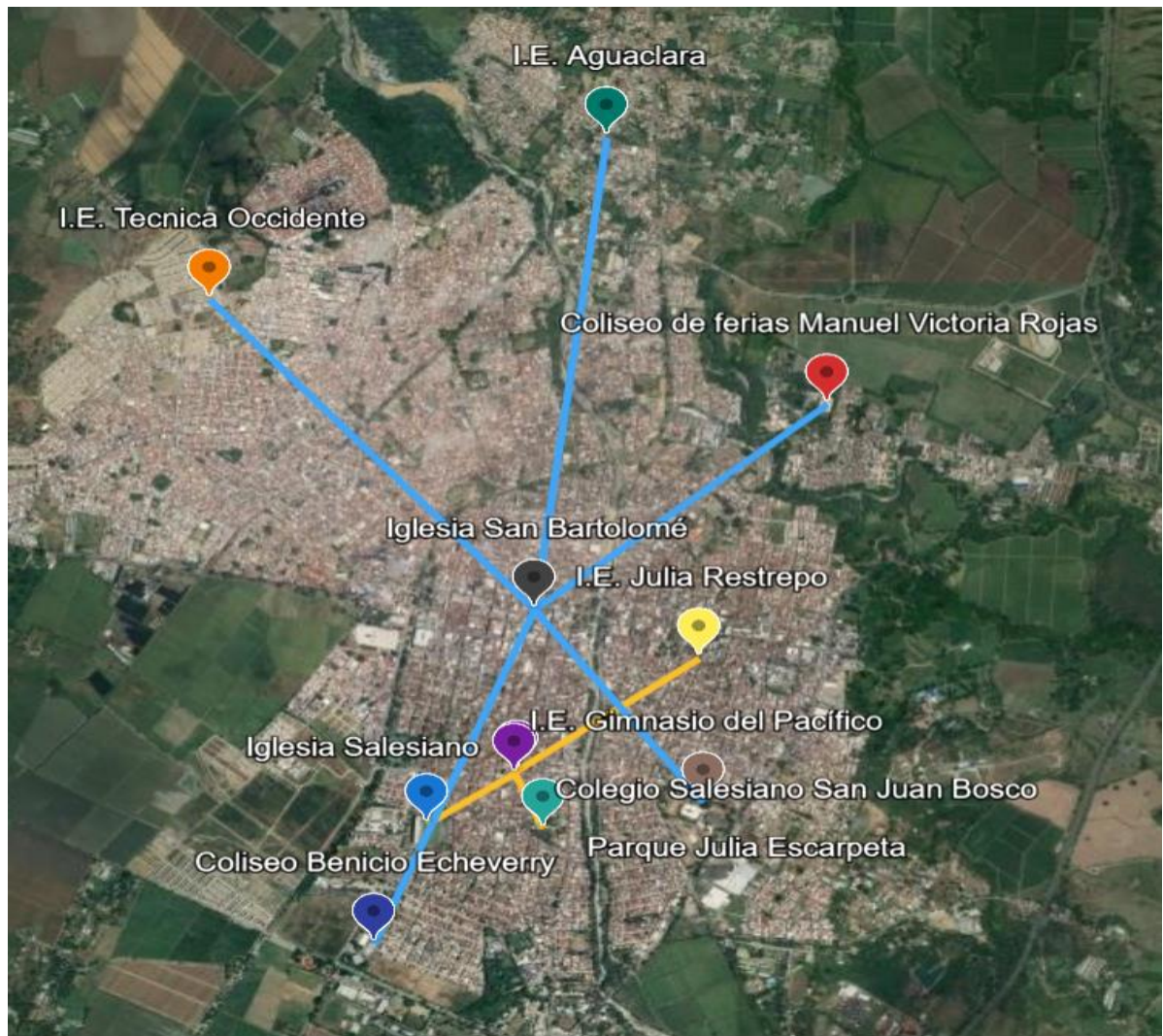
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, al realizar los ajustes en la demanda de los albergues, el tiempo de respuesta obtenido es de aproximadamente 9.94 minutos, lo que indica una mejora en comparación con los escenarios anteriores. Los costos operativos totales se estiman en 4,327,796.52 unidades monetarias, lo cual representa una ligera variación respecto al modelo original. Estos resultados reflejan que, a pesar del incremento en la demanda en algunos albergues, la asignación eficiente de los CEDIS ha permitido optimizar tanto los tiempos como los costos.

En este escenario, se mantienen abiertos dos centros de distribución (CEDIS). Iglesia Salesianos cubre cuatro albergues: Colegio Salesiano San Juan Bosco, Estadio Doce de Octubre, Parque Julia Escarpeta, e Institución Educativa Julia

Restrepo, mientras que Iglesia San Bartolomé cubre cinco albergues: Coliseo de ferias Manuel Victoria Rojas, Coliseo Benicio Echeverry, Institución Educativa Aguaclara, Institución Educativa Técnica Occidente, e Institución Educativa Gimnasio del Pacífico (figura 18). Esto implica que los demás centros de distribución, Terminal Transversal 12 y Parque Industrial Jacob Oliver, permanecen cerrados en este escenario.

Figura 18. Representación geoespacial de los resultados escenario 3.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al inventario pre-posicionado, Iglesia Salesianos cuenta con 350 kits, mientras que Iglesia San Bartolomé alberga 600 kits. Los centros Terminal Transversal 12 y Parque Industrial Jacob Oliver no manejan inventario en esta ocasión, ya que no fueron seleccionados para su apertura. Este escenario destaca cómo los ajustes en la demanda permiten un uso eficiente de los centros abiertos, manteniendo controlados tanto los tiempos de respuesta como los costos operativos.

En este capítulo se han analizado diversos escenarios para evaluar la efectividad del modelo de localización de centros de distribución y pre-posicionamiento de inventario. Los resultados obtenidos han mostrado cómo la variación en los pesos de ponderación y las capacidades de los centros de distribución afectan significativamente el valor objetivo del modelo y la asignación de albergues a los centros. La aplicación de diferentes valores de λ han permitido entender cómo priorizar la minimización del tiempo de respecto a los costos operativos, revelando la flexibilidad del modelo para adaptarse a distintas estrategias. Además, el ajuste en las demandas ha demostrado la capacidad del modelo para manejar fluctuaciones en las necesidades, proporcionando una visión integral de la dinámica de la distribución y el pre-posicionamiento.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La revisión de la literatura ([anexo 1](#)) ha proporcionado una base sólida para identificar los factores críticos que influyen en la localización de centros de distribución y en el pre-posicionamiento de inventario. Se ha destacado la importancia de considerar tanto el tiempo de respuesta como los costos operacionales en la toma de decisiones. Los estudios previos indican que un enfoque equilibrado entre estos factores es crucial para una respuesta efectiva en situaciones de emergencia. La metodología de Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) se utilizó para seleccionar y ponderar criterios relevantes, permitiendo una evaluación exhaustiva de las alternativas y facilitando una base objetiva para la formulación del modelo.

La identificación de zonas potenciales seguras se realizó mediante un trabajo de campo y documental de las características geográficas y de riesgo del municipio de Tuluá. Este análisis permitió determinar las ubicaciones para establecer los centros de distribución, basándose en criterios de accesibilidad, seguridad y proximidad a las áreas afectadas. La definición de estas zonas es esencial para garantizar una distribución eficiente y oportuna de la ayuda humanitaria, minimizando el tiempo de respuesta y contribuyendo a mejorar la cobertura de las necesidades de la población afectada.

La formulación del modelo matemático multiobjetivo ha integrado los factores clave identificados y las zonas definidas para crear una herramienta robusta para la toma de decisiones. Utilizando el modelo P-mediana, se han considerado tanto la minimización del tiempo de respuesta como la minimización de los costos asociados a las decisiones de apertura y mantenimiento de inventario. La participación de expertos y el análisis de diferentes escenarios han permitido ajustar el modelo a las

condiciones específicas del contexto y evaluar su rendimiento bajo distintas configuraciones de parámetros, mostrando la flexibilidad y aplicabilidad del modelo.

El análisis de los resultados en diferentes escenarios ha revelado cómo las variaciones en los parámetros del modelo, como los factores de ponderación y las capacidades de los centros de distribución, afectan el valor de ambas funciones de desempeño, la apertura de centros de distribución, la cantidad de inventario pre-posicionado en éstos y la asignación de albergues a cada centro abierto. La comparación de los escenarios ha demostrado la capacidad del modelo para adaptarse a cambios en las condiciones y necesidades, ofreciendo una visión integral de cómo las decisiones de localización y pre-posicionamiento pueden optimizarse para mejorar la eficiencia en la distribución de ayuda humanitaria.

En términos generales, este trabajo de grado ha proporcionado valiosas lecciones sobre la planificación estratégica en logística humanitaria, destacando la importancia del pre-posicionamiento de inventario y la localización eficiente de centros de distribución. A través de la aplicación de modelos de optimización, se ha demostrado que una planificación rigurosa y bien fundamentada no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fortalece la capacidad de respuesta en situaciones de emergencia. El aprendizaje obtenido subraya la necesidad de utilizar técnicas analíticas robustas y datos precisos para abordar desafíos logísticos complejos. Estos enfoques no solo aportan mejoras significativas en la gestión de recursos durante desastres, sino que también establecen una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la logística humanitaria, permitiendo la creación de estrategias aún más efectivas y adaptables para enfrentar las crisis globales.

En cuanto a la consideración de trabajos futuros, se recomienda explorar la inclusión de variables dinámicas en el modelo, como la variación temporal de la demanda y los costos operativos a lo largo de distintos periodos. Asimismo, sería interesante

considerar escenarios más complejos que incluyan múltiples desastres simultáneos o la evolución de las capacidades de los centros de distribución en función del desgaste de infraestructura. Otro enfoque valioso podría ser el análisis de incertidumbre mediante técnicas de optimización robusta o estocástica, para abordar la variabilidad en los tiempos de respuesta y las necesidades de ayuda humanitaria. Además, se sugiere investigar el impacto de la colaboración interinstitucional, donde múltiples organizaciones gestionen conjuntamente la cadena de suministro, mejorando así la eficiencia en la distribución de recursos. Finalmente, una extensión lógica sería el desarrollo de modelos multiobjetivo más avanzados que ponderen factores ambientales y sociales, como el impacto de la distribución en comunidades vulnerables o la sostenibilidad de los recursos empleados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abareshi, M., & Zaferanieh, M. (2019). A bi-level capacitated P-median facility location problem with the most likely allocation solution. *Transportation Research Part B: Methodological*, 123, 1–20. <https://doi-org.bd.univalle.edu.co/10.1016/j.trb.2019.03.013>

Abbas Mardani, Ahmad Jusoh, Khalil MD Nor, Zainab Khalifah, Norhayati Zakwan & Alireza Valipour (2015) Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014, *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28:1, 516-571, DOI: 10.1080/1331677X.2015.1075139

Alcaldía de Tuluá. (2023). Información Geográfica - Municipio Tuluá. [Tulua.gov.co. https://tulua.gov.co/publicaciones/343/informacion-geografica-alcaldia-de-tulua/](https://tulua.gov.co/publicaciones/343/informacion-geografica-alcaldia-de-tulua/)

Análisis de Situación de Población -ASP- Colombia (2023). UNFPA Colombia. <https://colombia.unfpa.org/es/publications/analisis-de-situacion-de-poblacion-asp-colombia-2023-capitulo-dinamica-demografica>

Arrieta Posada, J. G. (2011). Aspectos a considerar para una buena gestión en los almacenes de las empresas (Centros de Distribución, CEDIS). *Journal of Economics, Finance and Administrative Science*. <https://revistas.esan.edu.pe/index.php/jefas/article/view/260>

Alcaldía Municipal de Tuluá (2018). Tuluá Datos. <https://tulua.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=1501>

Arroyo, J. E. C., dos Santos Soares, M., & dos Santos, P. M. (2010). A GRASP heuristic with Path-Relinking for a bi-objective p-median problema. <http://www.softcomputing.net/his10/1569321193.pdf>

Aslan, E., & Çelik, M. (2019). Pre-positioning of relief items under road/facility vulnerability with concurrent restoration and relief transportation. *IIE Transactions*, 51(8), 847–868. <https://doi-org.bd.univalle.edu.co/10.1080/24725854.2018.1540900>

Ayala-García, J. y Ospino-Ramos, K. (2023). Desastres naturales en Colombia: un análisis regional. https://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/10669/DTSERU_317.pdf

Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1984). PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods. https://www.researchgate.net/publication/226334105_Promethee_Methods#fullTextFileContent

Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198-215. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221709000071>

Campos, A. G., Holm-Nielsen, N., Díaz, C. G., Rubiano, D. M., Costa, C. R., Ramírez, F., & Dickson, E. (Eds.). (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: Un aporte para la construcción de políticas públicas*. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial.

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/671321468026993367/pdf/701030ESW0P1290ESTION0DEL0RIESGOweb.pdf>

Carrasco, J. (2017). Aplicación de la Logística Humanitaria para atender la emergencia ocasionada por El Niño Costero en Piura. Tesis. Universidad de Piura. <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/bceab410-0aee-45e2-a710-c5e422004399/content>

Carvajal Ramírez, D. (2023). *Análisis bibliográfico de la aplicación de MCDM en la selección de proveedores* (Trabajo de fin de máster, Universidad de Valladolid).

Chandes, J. y Paché, G. (2009). Pensar la acción colectiva en el contexto de la logística humanitaria: Las lecciones del sismo de Pisco. Journal of Economics, <https://www.redalyc.org/pdf/3607/360733607003.pdf>

Chicas, B. C., Martínez, J. N., & González, D. R. (2009). "Análisis, Diseño e Implementación de un Centro de Distribución", Objetivo: tener la visión completa de las áreas que conforman un CDD y las variables que deben administrarse para su operación. Universidad Dr. José Matías Delgado. <https://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/BIBLIOTECA%20VIRTUAL/TESIS/04/IAI/ADCA0000922.pdf>

Ćirović, G., & Pamučar, D. (Eds.). (2022). *Multiple-Criteria Decision Making*. MDPI, Basel. ISBN 978-3-0365-2816-8. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2816-8>.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2017). Sigue la alerta por creciente súbita de los ríos en Tuluá. CVC. <https://cvc.gov.co/carousel/2785-sigue-la-alerta-por-creciente-subita-de-los-rios-en-tulua>

Correa, E. S., Steiner, M. T. A., Freitas, A. A., & Carnieri, C. (2001). A genetic algorithm for the P-median problem. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:NUMA.0000021767.42899.31>

Cruz Roja Colombiana. (2008). Manual Nacional para el manejo de Albergues Temporales. https://reconstruir.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/manual_final_albergues_temporales_1912011_035711-1.pdf

Daskin, M. S. (2013). Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications. Wiley. DOI:10.1002/9781118537015

Doodman, M., Shokr, I., Bozorgi-Amiri, A., & et al. (2019). Pre-positioning and dynamic operations planning in pre- and post-disaster phases with lateral transshipment under uncertainty and disruption. Journal of Industrial Engineering International, 15(Suppl 1), 53–68. <https://doi.org/10.1007/s40092-019-0317-7>

Eligüzcel, İ. M., & Özceylan, E. (2020). P-median and maximum coverage models for optimization of distribution plans: A case of United Nations Humanitarian Response Depots. In Smart and sustainable supply chain and logistics – Trends, challenges, methods and best practices

Ercole, R. A., Alberto, C. L., & Carignano, C. E. (2007). *TOPSIS en medición multicriterio de eficiencia*. XXX Congreso Argentino de Profesores Universitarios de Costos, Santa Fé. https://iapuco.org.ar/wp-content/uploads/2012/06/Trabajo_004.pdf

Escobar Iturbe, M. C., & González del Valle Campoamor, E. A. (2005). MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO. *Denarius*, (10), 63. Recuperado a partir de <https://denarius.izt.uam.mx/index.php/denarius/article/view/279>

Figueira, J. R., Greco, S., & Ehrgott, M. (2005). Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. <https://link.springer.com/book/10.1007/b100605>

Forman, E. H., & Gass, S. I. (2001). The Analytic Hierarchy Process: An Exposition. *Operations Research*, 49(4), 469–486. <http://www.jstor.org/stable/3088581>

Galindo, G., & Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. <https://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v230y2013i2p201-211.html>

Gobernación del Valle del Cauca (2014) Plan de Ordenamiento Territorial Departamental del Valle del Cauca. Recuperado de: <https://www.valledelcauca.gov.co/documentos/11207/potd-valle-del-cauca/>

Gómez Ramírez, D. Sarache Castro, W. (2016) Algunas tendencias de investigación en logística humanitaria. <https://www.redalyc.org/journal/5713/571360692011/html/>.

Hakimi, S. L. (1964). Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*, 12(3), 450–459. <http://www.jstor.org/stable/168125>

Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14336-14345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>

Jánošíková, L., & Žarnay, M. (2014). Location of emergency stations as the capacitated p-median problem. *Quantitative Methods in Economics (Multiple Criteria Decision Making XVII)*.
<https://www.researchgate.net/publication/303959968> LOCATION OF EMERGENCY STATIONS AS THE CAPACITATED P- MEDIAN PROBLEM

Jha, A. K., & Jha, S. (2021). A review of the analytic hierarchy process (AHP) and its applications in construction. *International Journal of Construction Management*, 21(1), 1-13.
<https://www.researchgate.net/publication/323335777> Review of application of a nalytic hierarchy process AHP in construction#fullTextFileContent

Karatas, M., Razi, N., & Tozan, H. (2017). A multi-criteria assessment of the p-median, maximal coverage and p-center location models. *Tehnički vjesnik*, 24(Supplement 2), 399–407. <https://doi.org/10.17559/TV-20160508131905>

López-Vargas, J. C., & Cárdenas-Aguirre, D. M. (2017). Gestión de la logística humanitaria en las etapas previas al desastre: revisión sistemática de la literatura. *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, 7(2), 203–216. <https://doi.org/10.19053/20278306.v7.n2.2017.6094>

Mendoza, Adel, Solano, Cristian, Palencia, Daniel, & Garcia, David. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(3), 348-360. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>

Muñoz, R., Escobar Román, J., Amparo, G., Florez R., & Serrano G, Y. (2023). ANUARIO ESTADISTICO “TULUÁ DATOS 2023”. En <https://tulua.gov.co/documentos/98/anuario-estadistico/>

Ndiaye, F., Ndiaye, B., & Ly, I. (2012). Application of the p-median problem in school allocation. *American Journal of Operations Research*, 2(2), 253–259. <https://doi.org/10.4236/ajor.2012.22030>

Opit, P. F. (2018). Coordinated stock pre-positioning model to support emergency relief response. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 403(1) doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/403/1/012049>

OIM (2012). Organización Internacional para las Migraciones Caja de Herramientas para la Gestión de Alojamientos Temporales. <https://repository.iom.int/handle/20.500.11788/120>

Organización Internacional para las Migraciones. (2014). Caja de Herramientas para la Gestión de Alojamientos Temporales. Bogotá, Fecha de reimpresión: abril de 2014. ISBN: 978-958-8469-62-1. Recuperado de https://www.sire.gov.co/documents/504649/508838/caja_documento/ec522d18-10ba-4a57-a680-ab416b5afbb0

Organización Internacional para las Migraciones. (2017). *Guía operacional para la gestión de alojamientos temporales en Ecuador* (ISBN 978-9942-8622-7-3). Quito: Departamento de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Comisión Europea ECHO y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/Guia-de-Alojamientos-Temporales.pdf>

Pérez Salazar, M. del R. (2020). El problema de ubicación de instalaciones en la cadena de suministro humanitaria. *Nextia*, 10, 12-24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4815663>

Pliego Martínez, O. A. (2012). Programación lineal multiobjetivo: Análisis, técnicas y casos de aplicación. Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/5090/1/TESIS.pdf>

Qi, M., Yang, Y., & Cheng, C. (2023). Location and inventory pre-positioning problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 177, 103236. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103236>

Rawls, C. G., & Turnquist, M. A. (2010). Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(4), 521-534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.08.003>

Regis-Hernández, F., Mora-Vargas, J., & Ruíz, A. (2017). A multi-criteria vertical coordination framework for a reliable aid distribution. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 10(4), 789-815. <https://doi.org/10.3926/jiem.2253>

Reyes Rubiano, L. S. (2015). Localización de instalaciones y ruteo de personal especializado en logística humanitaria post-desastre-caso inundaciones, Universidad de La Sabana). <https://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/15448>

Rodríguez, A. M. P., Reyes, J. J., & Orozco, D. L. P. (2021). Metodología para la priorización de la entrega de ayudas humanitarias en el contexto de la pandemia covid-19, utilizando la herramienta QFD Fuzzy. *Revista Logos Ciencia & Tecnología/Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 13(2), 72–84. <https://doi.org/10.22335/rlct.v13i2.1371>

Romero Laiton, C. A. (2017). Determinación del nivel de inventario de los recursos críticos a nivel agregado, en los nodos del sistema logístico humanitario colombiano, necesarios para atender un desastre de origen natural y de ocurrencia súbita. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/6314>.

Rueda-Velasco, F., López-Bello, C. A., Parada-Caro, G. D., Garzón-Luna, A., & Marroquín-Ávila, J. (2020). Disaster response logistics based on social assistance programs: Case study: Earthquake risk in Bogotá, Colombia. *Scientia et Technica*, 25(03), 455-462. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, ISSN-e: 2344-7214.

Russell, T. E. (2005). The Humanitarian Relief Supply Chain : Analysis of the 2004 South East Asia Earthquake and Tsunami. <http://hdl.handle.net/1721.1/33352>

Saaty R.W. (1988). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used, *Mathematical Modelling*, [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

Salazar, L., & Gonzalo, M. (2019). Seguridad alimentaria en América Latina y el Caribe. <https://doi.org/10.18235/0001784>

Santos Hernández, B. L., & Ruvalcaba Sánchez, M. L. G. (2019). Sostenibilidad de las cadenas de suministro humanitarias: perspectivas y desafíos. *Revista Venezolana de Gerencia*, 2, 131-150. Universidad del Zulia. <https://www.redalyc.org/journal/290/29063446007/html/>

SCHR/VOICE/ICVA. (2004). El Proyecto Esfera Humanitaria y Normas mínimas de respuesta humanitaria en casos de desastre (pp. 2–408). Ginebra, Suiza. Retrieved from <http://www.sphereproject.org>

SCM Definitions and Glossary of Terms. (2013). https://cscmp.org/CSCMP/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx

Segura, E., Carmona-Benitez, R. B., & Lozano, A. (2017). Implications of the assumptions on which the p-median problem are based when distribution network design. *Transportation Research Procedia*, 25, 1137–1143. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.126>

Shu, J., Song, M., Wang, B., Yang, J., & Zhu, S. (2022). Humanitarian relief network design: Responsiveness maximization and a case study of Typhoon Rammasun. *IIE Transactions*, 55(3), 301–313. <https://doi.org/10.1080/24725854.2022.2074577>

Sharif M, & Salari, M. (2015). A GRASP algorithm for a humanitarian relief transportation problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, 259–269. doi:10.1016/j.engappai.2015.02.013.

Superintendencia Nacional de Salud. (2021, septiembre). PLAN DE PREVENCIÓN, PREPARACIÓN Y RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS. Gov.co. <https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/planeacion/Planes/SST%20-%20PlanPPR%20Emergencias2021v2.pdf>

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). "A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi Criteria Decision-Making." *Journal of Management Science & Engineering Research*, 6, doi:10.30564/jmser.v6i2.5637.

Tomasini, R. M. y Van Wassenhove, L. N. (2009). From preparedness to partnerships: case study research on humanitarian logistics. *International Transactions in Operational Research*. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2009.00697.x>

Toskano Hurtado, G. B. (2005). El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores: Aplicación en la selección del proveedor para la Empresa Gráfica Comercial MyE S.R.L. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/toskano_hg.htm

Ülkü, M. A., Bell, K. M., & Wilson, S. G. (2015). Modeling the impact of donor behavior on humanitarian aid operations. *Annals of Operations Research*, 230 (1), 153-168. doi: 10.1007/s10479-014-1623-5

UNGRD. (2016). Manual de Logística para la Atención de Emergencias. <https://www.boyaca.gov.co/SecInfraestructura/images/OPAD/documentos/manualdeologistica.pdf>

UNGRD (2013). Estandarización de Ayuda Humanitaria de Colombia. Bogota, Colombia: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Manuales/Manual_de_Estandarizacion_AHE_de_Colombia.pdf

UNGRD. (2020). ¿Cuál es el riesgo por inundaciones en Colombia
<https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/noticias/2020/Cual-es-el-riesgo-por-inundaciones-en-Colombia.aspx>

UNGRD. (2022). Consolidado emergencias Fenómeno La Niña.
<https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Balance-situacion-de-desastre-Nacional.aspx>

Vargas, L. G. (1990). An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 2-8.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-H)