

Aplicación del análisis del centro de gravedad en el diseño de cadenas de suministro humanitarias para la atención de desastres: El caso de Colombia.

Juan Camilo López Vargas¹, Juan David Losada Losada², Verónica Duque Uribe¹

¹ Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

² Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales, Colombia.

Corresponding author: Juan Camilo López Vargas, jclopezva@unal.edu.co

(Recibido: 29-08-2023. Publicado: 12-11-2023.)

DOI: 10.59427/rccli/2023/v23.102-116

Resumen

En el diseño de cadenas de suministro humanitarias aparecen el preposicionamiento de inventarios y la localización de centros de distribución como decisiones estratégicas de alto impacto para la efectividad de la atención de poblaciones víctimas de desastres. Este trabajo presenta un método de localización de centros de distribución humanitaria a partir del caso de estudio colombiano. Se aplicó la metodología del centro de gravedad para determinar las coordenadas geográficas que representan las alternativas para ofrecer atención oportuna frente a emergencias y desastres en el país. Los datos trabajados han sido tomados de bases de datos de acceso público que constituyen registros históricos en Colombia. La información ha sido tratada y el método ha sido aplicado para generar tres lugares descentralizados en los cuales se puede consolidar la localización de centros de distribución humanitarios. Este trabajo demuestra la aplicabilidad de los principios logísticos provenientes del ámbito comercial tradicional hacia los contextos de alta complejidad e incertidumbre que implica la logística de desastres, y cómo se pueden favorecer los principios humanitarios de neutralidad, equidad e independencia que deben demarcar la atención de las poblaciones en condición de mayor vulnerabilidad.

Palabras claves: Logística humanitaria, Diseño de cadenas de abastecimiento, Localización de instalaciones, Análisis de centro de gravedad, Caso de estudio.

Abstract

Within the design of humanitarian supply chains, inventory prepositioning and distribution centers location emerge as high-impact strategic decisions for the effectiveness of humanitarian action in providing aid to populations affected by disasters. This study presents a method for locating humanitarian distribution centers based on the Colombian case study. The gravity center methodology was applied to determine the geographical coordinates that represent alternatives for providing timely assistance in emergencies and disasters in the country. The data used were extracted from open access databases regarding to historical records in Colombia. The information was processed and the method was applied to generate three decentralized places where humanitarian distribution centers can be located. This study demonstrates the applicability of logistical principles from the traditional commercial framework to the highly complex and uncertainty contexts of disaster logistics, and how these principles can promote humanitarian principles of neutrality, equity, and independence, which should guide the assistance provided to populations in conditions of greater vulnerability.

Keywords: Humanitarian logistics, Supply chain design, Facility location, Gravity center analysis, Study case.

1 Introducción

La logística ha sido asociada típicamente a los sectores empresariales e industriales, al concentrarse en la gestión del aprovisionamiento, el control de inventarios, y la distribución de bienes físicos a lo largo de la cadena de abastecimiento (Sarache y Morales, 2016). Una cadena de abastecimiento corresponde al sistema conformado por las partes involucradas en la búsqueda de la satisfacción del cliente; mediante la integración de fabricantes, proveedores, transportistas, almacenistas y vendedores al detalle (Chopra y Meindl, 2008). En el marco estratégico se encuentra el proceso de diseño de la red de abastecimiento, que considera los actores que la constituyen, la decisión de la localización de instalaciones, los medios y modos de transporte, así como los sistemas de manejo de inventarios (Sarache y Morales, 2016). Estas decisiones resultan clave para el desempeño de la red, pues favorecen la consecución de objetivos de efectividad y eficiencia para el sistema logístico.

Los avances investigativos recientes han propendido porque los principios teóricos de la logística y la gestión de cadenas de abastecimiento se diversifiquen a otros sectores, de lo cual se desprenden campos de interés como la logística hospitalaria, la logística urbana, y la logística humanitaria. En lo que corresponde a la logística humanitaria (LH), esta se concentra en la gestión de operaciones para el manejo de desastres, e incluye los procesos ejecutados antes, durante y después de los desastres, con el propósito de minimizar el impacto, sufrimiento, la pérdida de vidas humanas, y facilitar el retorno de la comunidad afectada a su condición de normalidad (Altay y Green, 2006; Powell et al., 2016; Rodríguez-Espíndola et al., 2018). La LH engloba la estimación, aprovisionamiento, almacenaje, transporte, distribución y coordinación de los bienes físicos, personas y servicios requeridos para la atención efectiva, y con los mínimos costos posibles, de las víctimas generadas por desastres naturales y antrópicos (Mohan et al., 2013; Day, 2014; Sharif y Salari, 2015).

Los actores y sectores que participan de la LH pueden organizarse bajo un esquema de cadena de abastecimiento (Day, 2014). Así, una cadena de suministro humanitaria (HSC, por sus siglas en inglés) se asume como un sistema, conformado por múltiples y diferentes sectores, encargado de gestionar los procesos necesarios para atender eventos de desastre, mediante el intercambio de flujos de materiales y de información, mientras integra y coordina la participación de todas las partes involucradas y facilita la acción humanitaria (Day et al., 2012; Gavidia, 2017). Una HSC puede ser representada de acuerdo con lo propuesto por Balcik et al., (2010), de la forma como se presenta en la Figura 1.

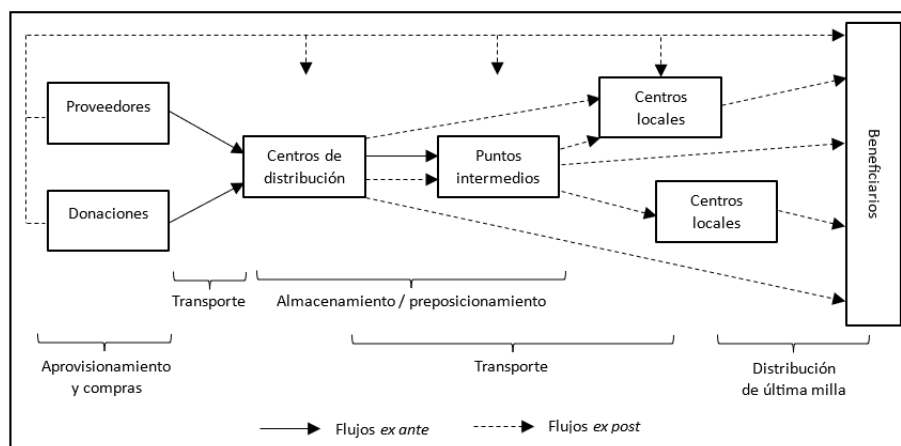


Figure 1: Estructura general de una cadena de suministro humanitaria.

Fuente: Adaptado de Balcik et al. (2010).

La estructura de la red mostrada en la figura 1 implica una concentración de esfuerzos logísticos hacia la atención de la población en condición de alta vulnerabilidad, que reciben el auxilio humanitario para mitigar su sufrimiento generado como consecuencia de la ocurrencia de un desastre, es decir, el socorro y distribución de la ayuda humanitaria se ofrece en los momentos *ex post* al fenómeno de desastre. Bajo este enfoque, el flujo físico de materiales posee una dinámica tipo *push*, pues la red de suministro se activa bajo la demanda de bienes requeridos para la atención de víctimas ubicadas en zonas de desastre (Day et al., 2012; Baskaya et al., 2017). Los recursos físicos provienen típicamente de fuentes de suministro externas (representados en proveedores y donantes), mediante un esquema de preposicionamiento de inventarios y preparación de equipos y recursos previamente y de forma anticipada a la condición de emergencia, esto es, la preparación de recursos humanitarios debería llevarse en los momentos *ex ante* a la ocurrencia del desastre (Bhattacharya et al., 2014; Kunz et al., 2014). Resulta crítico que el diseño de la red logística defina la ubicación concreta de los puntos intermedios de acopio, almacenaje, centros de distribución y entrega, de forma estratégica para garantizar la fluidez y agilidad de los procesos de entrega.

durante la fase de atención y respuesta al desastre. Las necesidades de atención dependen de las prioridades locales, que varían de acuerdo con las fases de la gestión de desastres (preparación, respuesta y recuperación), y según el tipo de desastre y las condiciones geográficas de cada región de interés (Day et al., 2012; Caunhye et al., 2016; Hasanzadeh y Bashiri, 2016; Rezaei-Malek et al., 2016; Rodríguez-Espíndola et al., 2018).

En tanto que se vislumbra una oportunidad por aportar esquemas efectivos en decisiones estratégicas de diseño, que propendan por el mejoramiento de los procesos logísticos en el manejo de desastres, se asume la localización de instalaciones como una decisión de alta relevancia a nivel administrativo, que favorece el aprovisionamiento anticipado de inventarios de bienes físicos representados en: alimentos, artículos sanitarios, medicamentos, tiendas de campaña, ropa, equipos de comunicación, equipamiento de rescate, equipos de remoción, y vehículos (Nikbaksh y Farahani, 2011). La localización persigue la mejor decisión de ubicación geográfica para alistar los ítems humanitarios y con ello favorecer su ágil utilización y distribución, bajo un mecanismo de preposicionamiento de inventarios (Kovács y Spens, 2009; Chakravarty, 2014; Liu y Guo, 2014; Garrido et al., 2015; Rodríguez-Espíndola y Gaytán, 2015). Dentro de las herramientas cuantitativas de diseño de la cadena de abastecimiento, y particularmente, en decisiones de localización, se encuentra el método de centro de gravedad, cuya técnica matemática se utiliza para hallar la mejor localización de un único punto de distribución que ofrezca la cobertura a varios puntos de demanda, y que considera factores de distancia, volúmenes de carga por despachar, y ubicación de los centros de demanda (Heizer y Render, 2007; Chase et al., 2009).

El propósito de este trabajo es aplicar el método de localización del centro de gravedad al caso colombiano, y sugerir puntos clave para la ubicación de centros de distribución que permitan mejor cobertura y rápida respuesta ante potenciales escenarios de emergencia, bajo un enfoque ex ante. La formulación de estrategias pertinentes para el diseño de cadenas de abastecimiento humanitarias se consolidará a partir del análisis de registros históricos de desastres ocurridos en el país en años recientes. Para dar cumplimiento a los objetivos trazados, este artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el método elegido, junto con la presentación del caso y los datos obtenidos para el estudio; la sección 3 contiene los resultados generales de la aplicación del método matemático y la obtención de los puntos estratégicos para ubicar centros de distribución humanitarios; en la sección 4 se hace una discusión de los resultados obtenidos, y en la sección 5 se ofrecen elementos de cierre y conclusiones del trabajo.

2 Metodología

2.0.1 Técnica de análisis del centro de gravedad

El método del centro de gravedad se considera una técnica matemática que permite determinar el punto de localización (o coordenadas) de un centro de distribución (CEDI), de modo que se logra la minimización de los costos de transporte (Heizer y Render, 2007). Al ser un método criterio, aplica un enfoque de análisis carga-distancia respecto de los puntos de demanda, junto con el factor económico que incorpora el costo de transporte de la carga (Krajewski et al., 2008; Chase et al., 2009). La base del método supone que la región de influencia puede representarse bajo un plano bidimensional, donde se trabajan distancias geométricas entre cualquier par de puntos en el plano, con lo que los costos de transporte crecerán de forma proporcional con las distancias recorridas (Chopra y Meindl, 2008). La técnica del centro de gravedad es útil para el proceso estratégico de diseño de cadenas de abastecimiento, pues se emplea para ubicar centros de almacenamiento o de distribución intermedios; ya sea para ubicar centros de acopio, ante lo cual los puntos de interés se asumen como generadores de carga, o ya sea para localizar centros de distribución, donde los puntos se convierten en puntos de destino o de consumidores de la carga (Chase et al., 2009; Sarache y Morales, 2016).

En términos procedimentales, la aplicación del método obliga a conocer la zona del caso y para ello un trabajo de campo puede adelantarse a fin de conocer los puntos específicos de interés, así como los volúmenes de carga a transportar desde el centro de distribución que se va a ubicar (Sarache y Morales, 2016). El siguiente paso consiste en asignar las coordenadas x y y de los puntos de consumo, a partir de la longitud y latitud geográficas, para consolidar un sistema de coordenadas cartesianas (Krajewski et al., 2008; Chase et al., 2009). Aunque el punto de origen y la escala del plano aparecen arbitrarios, lo importante es que las distancias estimadas representen correctamente la condición real (Heizer y Render, 2007). Una vez obtenida la información necesaria (volúmenes de carga y coordenadas cartesianas), se procede a estimar las coordenadas iniciales del CEDI x^* y y^* con base en la aplicación de las ecuaciones (1) y (2), que se muestran en seguida.

$$x^* = \frac{\sum x_i V_i}{\sum V_i} \quad (1)$$

$$y^* = \frac{\sum y_i V_i}{\sum V_i} \quad (2)$$

Donde:

x^* : Coordenada en x del CEDI (centro de gravedad);
 y^* : Coordenada en y del CEDI (centro de gravedad);
 x_i : Coordenada en x del punto de consumo i ;
 y_i : Coordenada en y del punto de consumo i ; y
 V_i : Volumen de carga demandado por el punto de consumo i

. Teniendo el par de coordenadas (x^* , y^*) de la localización del CEDI, se procede a calcular la distancia geométrica d_i respecto de cada punto de consumo i . Ello se obtiene a partir del uso de la ecuación (3).

$$d_i = \sqrt{(x^* - x_i)^2 + (y^* - y_i)^2} \quad (3)$$

De acuerdo con Chopra y Meindl (2008), el método puede optimizarse al emplear una secuencia iterativa basada en las distancias (d_i) y los costos de transporte (C_i). Cada iteración del modelo arroja un nuevo par de coordenadas x' y y' para el CEDI. Estas coordenadas se obtienen mediante las ecuaciones (4) y (5).

$$x' = \frac{\sum x_i V_i C_i / d_i}{\sum V_i C_i / d_i} \quad (4)$$

$$y' = \frac{\sum y_i V_i C_i / d_i}{\sum V_i C_i / d_i} \quad (5)$$

Como la aplicación de las ecuaciones (4) y (5) generan una nueva localización, las distancias con los puntos de consumo cambiarán. Esta condición permite la iteración del procedimiento. El modelo se repite generando nuevas coordenadas y distancias, hasta tanto las coordenadas (x' , y') de dos iteraciones consecutivas sean casi iguales (Chopra y Meindl, 2008).

La técnica del centro de gravedad produce matemáticamente la localización ideal, que logra la minimización de las distancias ponderadas entre el CEDI y los centros de consumo, incorporando factores de distancia, carga a transportar, y costos de transporte (Heizer y Render, 2007). Aunque una localización matemática pueda no corresponder a una posibilidad factible en condiciones reales, la técnica surge como un punto de partida aceptable para los tomadores de decisiones, para proceder con la búsqueda de sitios cercanos a la localización óptima que cuente con la infraestructura y capacidades logísticas suficientes para su funcionamiento (Chopra y Meindl, 2008; Krajewski et al., 2008).

2.1 Presentación del caso

Colombia es un país que se localiza sobre la franja ecuatorial entre los 4°S y 13°N, dentro de la llamada Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), y por estar en el extremo noroccidental suramericano, posee amplias extensiones costeras en los océanos Atlántico y Pacífico (UNGRD, 2014; IDEAM y UNAL, 2018). Por su ubicación geográfica, el país se ve influenciado por la variabilidad interanual del Océano Pacífico y sus fases extremas de los fenómenos de El Niño y La Niña, además que la región pacífica colombiana es considerada como una de las más lluviosas del mundo (IDEAM y UNAL, 2018). De otro lado, gran parte del territorio continental colombiano es atravesado por la cordillera de los Andes, lo que produce en su interior entornos geomorfológicos complejos, registros de 2000 mm de precipitaciones al año, y riesgos significativos de deslizamientos e inundaciones, así como riesgos sísmicos y volcánicos (Banco Mundial, 2012; Hardoy and Velásquez, 2014; UNGRD, 2014; UNGRD, 2016). Se estima que más del 85% de la población nacional está expuesta a vulnerabilidad sísmica, un 28% a inundaciones y más del 30% vive expuesta a amenazas por deslizamientos (UNGRD, 2014).

Con este panorama, los actores involucrados en el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres en Colombia (SNGRD) han exaltado la necesidad por mejorar las capacidades de gestión del riesgo de desastres en Colombia. Esto con el propósito de aumentar la resiliencia de las comunidades, las capacidades operativas y logísticas para la preparación y respuesta a los desastres, a conciencia de los crecientes fenómenos de cambio climático, manifestados principalmente a través de eventos extremos de origen hidrometeorológico (UNGRD, 2014; UNGRD, 2016). Al respecto, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo sostiene que, para la segunda mitad del siglo, la región andina (ubicada en el interior del país) tendrá incrementos de hasta un 30% en las precipitaciones respecto de los registros actuales. Esto condicionará las decisiones políticas respecto del uso de suelo y la planificación del territorio, pero también implicarán aumentos críticos en los riesgos por inundaciones y deslizamientos, con considerables impactos socioeconómicos para el país (PNUD, 2015).

Dadas las condiciones geográficas, climáticas y sociales que se presentan en el país, resulta pertinente la formulación de estrategias y metodologías soportadas técnicamente, desde el sector académico, para incrementar las capacidades institucionales de respuesta frente a eventuales y futuros desastres. Las complejidades del caso colombiano justifican el desarrollo de estudios académicos e investigativos en el marco de la logística humanitaria y, particularmente, enfocados en las decisiones estratégicas de diseño de cadenas de abastecimiento y la localización de centros de distribución humanitaria, en concordancia con el propósito definido para este artículo.

2.2 Obtención y tratamiento de datos

Dado el carácter multifactorial del método de centro de gravedad, surge la necesidad de obtener los datos abordar para el caso elegido. La búsqueda de información se limitó a los siguientes términos: registros históricos de desastres acontecidos en el país; municipios afectados y víctimas producidas por cada evento; coordenadas concretas de los puntos de demanda; volumen de carga a despachar a los sitios, en función de la cantidad de víctimas; distancias por recorrer y costos relacionados con el transporte.

Parte de estas necesidades se suplieron con el acceso a la base de datos “Emergencias UNGRD” elaborada por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2022) y publicada en la plataforma “Datos Abiertos” del gobierno colombiano. Allí se reportan los eventos acontecidos y registrados en territorio nacional durante los años 2019 a 2021. Esta información aparece actualizada al mes de junio de 2022. Se logran contabilizar, para el trienio, más de 300 mil familias afectadas y demandantes de atención humanitaria. Además, alrededor de 590 municipios registraron eventos que produjeron afectación directa sobre la población.

Respecto de las coordenadas de los municipios, se utilizó la base de datos abierta Simple Maps (2023), con información actualizada al mes de marzo de 2023. Sobre ella se aplicó un filtro geográfico para llegar a los valores correspondientes a las municipalidades de Colombia. Ambas bases de datos fueron cruzadas y se realizó una limpieza de datos a fin de descartar registros incompletos, eventos que no registraron víctimas (cuantificados en fallecidos, heridos, o familias afectadas), así como de emergencias que no tenían un municipio y/o departamento claramente definido. Al final del proceso se obtuvo una matriz con 592 registros que consolidan los eventos e impactos agrupados por municipio, lo que permite la aplicación del método propuesto en este trabajo. En lo que respecta a la cuantificación del volumen de carga demandado por municipio, se tuvieron en cuenta los estándares establecidos por la UNGRD (2013) para el manejo de emergencias, según los cuales, cada núcleo familiar debe ser atendido con un kit alimentario que resulte suficiente para el consumo de una semana. La política busca garantizar la ingesta de alimentos de las personas afectadas y evitar el deterioro de su situación nutricional. El kit consta de elementos esenciales, como aceite vegetal, arroz, pasta, frijol, lenteja, chocolate, y panela. En total, cada kit alimentario tiene un peso de 12.5 Kg. Este auxilio se despacha y entrega en el marco de las primeras 72 horas posteriores a la ocurrencia del evento. Se asume, entonces, que cada familia en condición de vulnerabilidad demanda una carga de 12.5 Kg o, lo que es equivalente, 0.0125 toneladas de ayuda humanitaria.

La información concerniente al transporte se asume a partir de los aportes de Ozdamar (2011). Se tiene que un medio ágil, efectivo, aunque costoso, para el transporte de alimentos, equipos y demás ayuda humanitaria, es el helicóptero, pues permite versatilidad y velocidad para la salida y llegada desde puntos estratégicos. Información relevante sobre este medio de transporte se presenta seguidamente (Ozdamar, 2011):

- Una hora de vuelo puede costar entre 2000 y 3000 dólares americanos;
- La velocidad crucero alcanza los 315 Km/h;
- Cada trayecto puede tener un alcance de 2 horas y 40 minutos; y
- Su capacidad le permite llevar 2.5 toneladas de carga interna, y 12 toneladas de carga externa, es decir, su capacidad total llega a 14.5 toneladas.

Si se relacionan el costo máximo por kilómetro, la velocidad crucero y la capacidad máxima de carga, puede calcularse:

$$\frac{USD3000/h}{315Km/h * 14.5ton} = USD0.657/Km.ton$$

De modo que estimamos el parámetro del costo de transporte, y que asumimos como uniforme para el despacho a cualquier lugar del país. Así: $C_i = USD\ 0.657/km.ton$.

Por otra parte, las distancias se manejan en unidades de km. La estimación de las distancias recorridas desde el centro de gravedad hasta los puntos de demanda se realiza en función de las coordenadas geográficas de los sitios involucrados.

Todo el proceso de cruce de bases de datos, limpieza, tratamiento y consolidación de los datos definitivos, junto con los parámetros de costo y distancias, se realizó en la librería Pandas del lenguaje de programación Python. Así se cumplieron las necesidades de información expuestas anteriormente. Los datos correspondientes a los

eventos registrados por municipio, la ubicación geográfica de los municipios (coordenadas basadas en latitud y longitud), la cuantificación de familias afectadas por evento, y la demanda de carga (en toneladas) se presentan de forma resumida en la Figura 2. Con la información disponible se procede con la aplicación del método del centro de gravedad para encontrar el sitio estratégico, en coordenadas geográficas, para localizar un CEDI de alcance nacional que cubra las demandas humanitarias. Estos resultados se comparten en la siguiente sección.

	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	FAMILIAS	DEMANDA
0	CAUCA	TIMBIO	2.3445	-76.6839	11.0	0.1375
1	ANTIOQUIA	MEDELLIN	6.2308	-75.5906	624.0	7.8000
2	VALLE DEL CAUCA	CALI	3.4206	-76.5222	32.0	0.4000
3	ATLANTICO	BARRANQUILLA	10.9833	-74.8019	2892.0	36.1500
4	BOLIVAR	CARTAGENA	10.4000	-75.5000	34395.0	429.9375
...
587	ANTIOQUIA	YALI	6.6767	-74.8411	64.0	0.8000
588	VALLE DEL CAUCA	EL DOVIO	4.5167	-76.2333	7.0	0.0875
589	CASANARE	OROCUE	4.7942	-71.3400	6.0	0.0750
590	CHOCO	JURADO	7.1114	-77.7714	1340.0	16.7500
591	BOLIVAR	SAN FERNANDO	9.2797	-74.5339	350.0	4.3750

Figure 2: Consolidación de datos requeridos en el lenguaje Python.

3 Resultados

3.1 Localización del centro de distribución (CEDI)

Dado que el manejo de datos se apoyó en el lenguaje Python, la aplicación del método de centro de gravedad se adelantó con librerías pertinentes como Pandas, Numpy y Folium. Se tomó la matriz consolidada (que se muestra en la figura 2) y sobre ella se usaron las ecuaciones (1) y (2) para los 592 registros de los municipios con la intención de hallar las coordenadas iniciales del CEDI. Después se aplicó el procedimiento iterativo, mediante las ecuaciones (3), (4), y (5). La programación del modelo se elaboró con un criterio de parada, tal que la corrida se detenga cuando las coordenadas x' y y' halladas en una iteración (t) implique una distancia inferior a 10 km de las coordenadas x' y y' de la iteración previa ($t-1$). Los resultados obtenidos, en función de las coordenadas geográficas del CEDI, se resumen en la tabla 1.

Table 1: Aplicación del centro de gravedad en el caso colombiano.

Iteración (t)	Coordenada X* (Longitud)	Coordenada Y* (Latitud)	Diferencia (en Km)
0	-75.01739	7.19561	-
1	-75.05168	7.62717	48.13
2	-75.03484	7.88079	28.26
3	-75.02160	8.03621	17.34
4	-75.00762	8.12747	10.26
5	-74.99590	8.18177	6.17

En la tabla 1, la iteración 0 corresponde a la aplicación de la primera parte del método (ecuaciones (1) y (2)), y el programa ha iterado 5 veces el método de mejoramiento hasta obtener un cambio posicional con un reajuste menor a 10 km de distancia respecto de la alternativa anterior. Se encontró de este modo, y con base en los datos trabajados, que el CEDI debería localizarse en las coordenadas geográficas: 8.18177 N, 74.99590 W. En la figura 3 se muestran, en color rojo, los sitios de desastre, o puntos de demanda, ocurridos en el país, y el círculo de color azul representa la localización del CEDI obtenido a través del método de centro de gravedad.

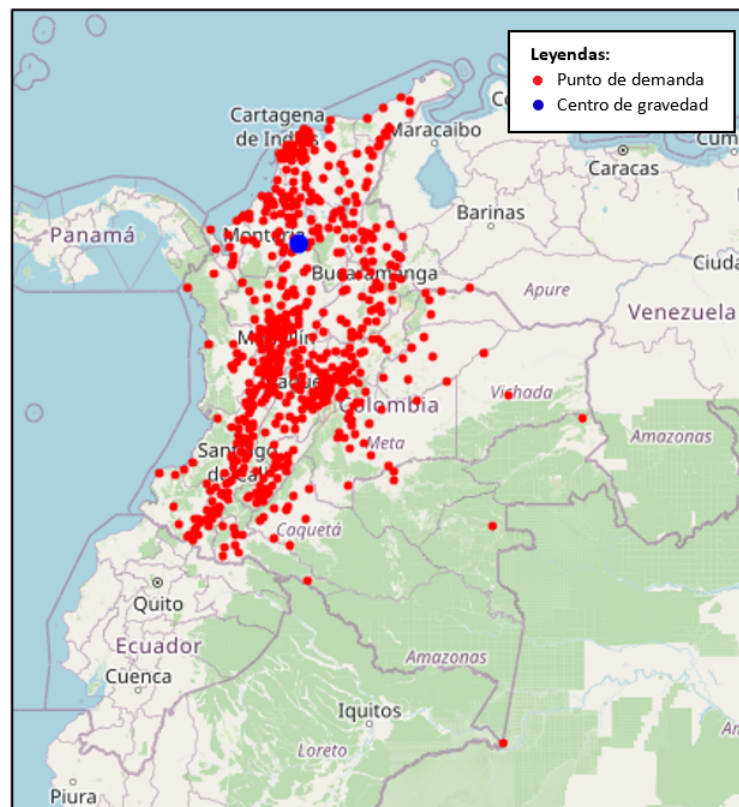


Figure 3: Localización del CEDI obtenido con el método propuesto.

Fuente: Los autores con el uso del lenguaje Python.

La ubicación de las coordenadas corresponde a un lugar no urbanizado en el territorio colombiano. Al respecto, se tienen las poblaciones más cercanas: Ayapel (8.312 N, 75.145 W) en el departamento de Córdoba, y Nechí (8.095 N, 74.775 W) y Caucasia (7.984 N, 75.198 W), ambos en el departamento de Antioquia. Estos municipios son pequeños en población y en capacidades logísticas instaladas, además que se ubican en las periferias de sus propios departamentos. La ciudad capital más cercana al centro de gravedad es Montería (8.76 N, 75.885 W) en el departamento de Córdoba, ciudad ubicada en el norte de Colombia.

A partir de los resultados logrados, el CEDI debería ser ubicado en la zona comprendida por el departamento de Córdoba, pues allí se alcanza el lugar concéntrico a todos los puntos de demanda del país, y también respecto de los volúmenes de demanda que se suscitan en los territorios. Sin embargo, localizar un CEDI en el norte del país para garantizar un alcance nacional puede suscitar complejidades logísticas para llegar a regiones distantes de Colombia. Al respecto, hemos optado por emplear una política alternativa al diseño de la cadena de abastecimiento humanitario, que se relaciona con la descentralización del sistema. Ello conduce al desarrollo de varios centros de distribución especializados en el cubrimiento territorial de distintas regiones en el país. Sobre los resultados de esta política alternativa se comentará en la siguiente sección.

3.2 Localización de n centros de distribución

En consideración de la extensión territorial de Colombia, y de las demandas por cubrir en zonas distantes desde el centro de gravedad que se estimó previamente, resulta pertinente considerar un esquema descentralizado en el sistema logístico de distribución humanitaria. De este modo, se definen n puntos para la localización de CEDIS en el país. La estrategia, a partir de estas consideraciones, estriba en la descentralización de la red en un número específico de centros de gravedad. Se ha fraccionado el territorio nacional en tres zonas ($n=3$) incluyendo en ellas los departamentos que las conforman, así: (i) zona Caribe, al norte de Colombia; (ii) zona Pacífico, al occidente; y (iii) zona Interior, que reúne las regiones Andina, Orinoquia, y Amazonía de Colombia.

3.2.1 Centro de gravedad en el Caribe colombiano

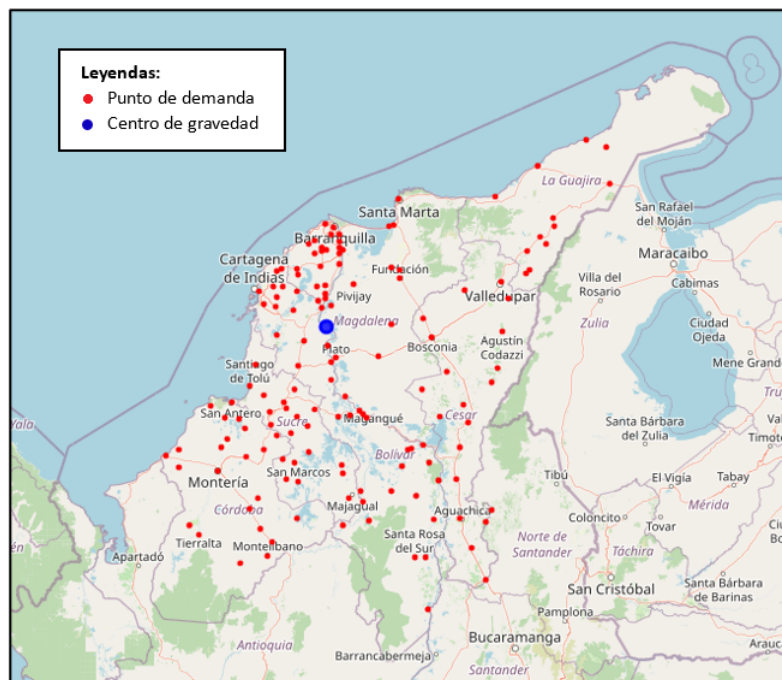
Se delimitó la región Caribe al filtrar la información de los eventos, víctimas y demanda a los municipios que comprenden solo a esta región del norte colombiano. Particularmente, se tomaron los municipios de los departamentos: Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena, y Sucre. Al limitar los datos se procedió con el método del centro de gravedad y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 2.

Table 2: Aplicación del centro de gravedad en la región Caribe.

Iteración	Coordenada X* (Longitud)	Coordenada Y* (Latitud)	Diferencia (en Km)
0	-74.58816	10.03253	-
1	-74.79147	10.06452	22.88
2	-74.87691	10.07205	9.53

Fuente: Los autores.

La aplicación del método en esta región solo requirió de dos iteraciones del programa para llegar a una solución que cumpliera con el criterio de parada. Se encuentra en la tabla 2 que las coordenadas de un CEDI para el Caribe colombiano deberían localizarse en 10.072 N, 74.876 W. En la figura 4 se expone el mapa regional con el CEDI ubicado según el resultado obtenido. Este punto no corresponde a un lugar dentro de una cabecera municipal. El municipio más próximo es El Guamo (10.035N, 74.996 W), departamento de Bolívar. Mientras que la ciudad capital más cercana es Cartagena (10.423 N, 75.525 W), también en Bolívar.

**Figure 4:** Localización del CEDI en la región Caribe.

Fuente: Los autores con el uso del lenguaje Python.

A partir de esta información, puede sugerirse que un sitio estratégico para instalar un CEDI de carácter humanitario, con capacidades logísticas suficientes, y que brinde cobertura a esta región, podría localizarse en la ciudad de Cartagena de Indias.

3.2.2 Centro de gravedad en el Pacífico colombiano

Para esta región occidental de Colombia, se tomaron los datos de los 4 departamentos que la constituyen: Cauca, Chocó, Nariño, y Valle del Cauca. Sobre ellos se aplicaron las ecuaciones e iteraciones necesarias para llegar a un centro de gravedad. La tabla 3 resume los resultados obtenidos con la metodología aplicada, mientras que la figura 5 corresponde a la distribución geográfica de los puntos de demanda y de localización del CEDI humanitario.

Table 3: Aplicación del centro de gravedad en la región Pacífico.

Iteración	Coordenada X* (Longitud)	Coordenada Y* (Latitud)	Diferencia (en Km)
0	-77.10299	4.29199	-
1	-76.96406	4.23807	16.56
2	-76.95699	4.21263	2.93

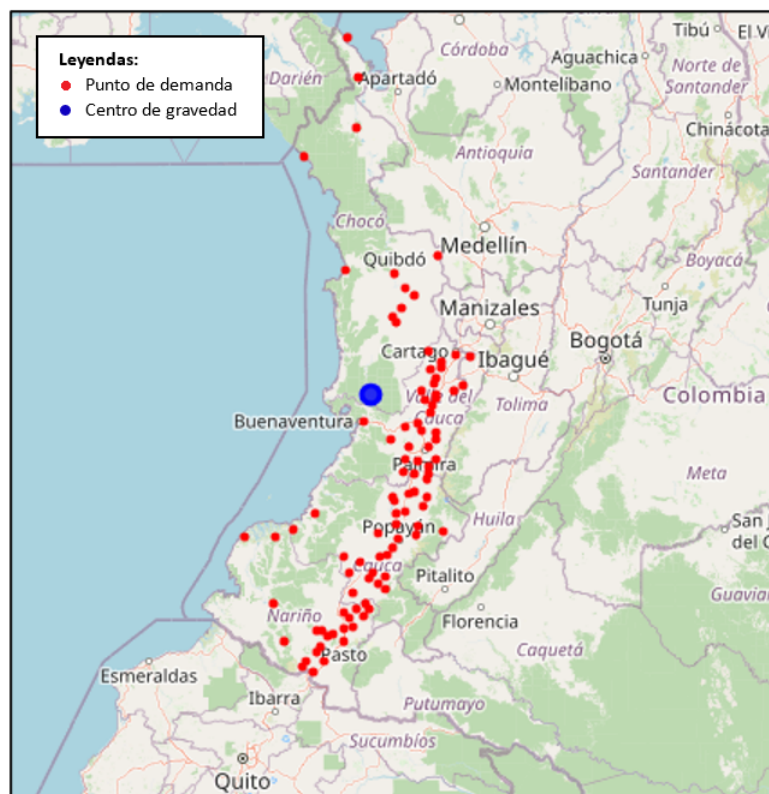


Figure 5: Localización del CEDI en la región Pacífico.

Fuente: Los autores con el uso del lenguaje Python.

De acuerdo con el resultado alcanzado, el municipio más cercano al centro de gravedad es Buenaventura (3.877 N, 77.026 W), en el departamento del Valle del Cauca. Este municipio representa un sitio estratégico para el comercio internacional de Colombia, pues allí se ubica el principal puerto marítimo del Pacífico colombiano y es el principal puerto que permite el intercambio comercial con Asia. Dada su capacidad logística, este municipio podría albergar el CEDI humanitario para la región.

3.2.3 Centro de gravedad en el Interior colombiano

La tercera región incluye los otros 20 departamentos que hacen parte del territorio continental de Colombia, uniendo tres regiones geográficas: Andina, Orinoquia, y Amazonía. Esta región abarca una extensión importante, pero, con base en los datos trabajados, se obtienen resultados que permiten lograr cobertura y centralidad a partir del método. Los datos resultantes del método se presentan en la tabla 4. Como antes, se presenta el esquema gráfico de la localización del centro de gravedad, mediante la figura 6.

Table 4: Aplicación del centro de gravedad en el Interior de Colombia.

Iteración	Coordenada X* (Longitud)	Coordenada Y* (Latitud)	Diferencia (en Km)
0	-74.72716	4.38523	-
1	-74.82451	4.51335	17.88
2	-74.87294	4.57782	8.96

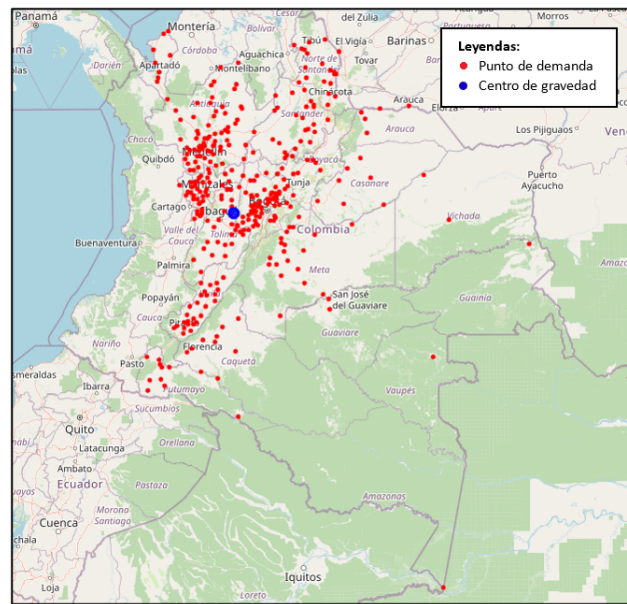


Figure 6: Localización del CEDI en la región del interior.
Fuente: Los autores con el uso del lenguaje Python.

De acuerdo con los resultados de la tabla 4, se requirieron de dos iteraciones para cumplir con los protocolos de parada del programa, de modo que se obtienen las coordenadas pertinentes para la tercera región estudiada, en 4.577 N, 74.872 W. En términos geográficos, el municipio que presenta mayor proximidad a este centro de gravedad es Piedras (4.543 N, 74.877 W), municipalidad del departamento de Tolima. No obstante, no resulta muy lejana la ciudad de Ibagué (4.437 N, 75.2 W), como opción más pertinente, dadas sus capacidades logísticas, para ubicar allí el CEDI regional.

La aplicación del método de centro de gravedad ha posibilitado definir 3 centros de distribución humanitarios para 3 regiones del territorio nacional, a partir de una estrategia de descentralización del sistema logístico. La figura 7 muestra el esquema de distribución por regiones y la ubicación de los CEDIS descentralizados para el caso estudiado. Con lo anterior, se posibilita una pertinencia en la cobertura y la agilidad en la entrega del auxilio humanitario a poblaciones vulnerables ubicadas en zonas distantes.

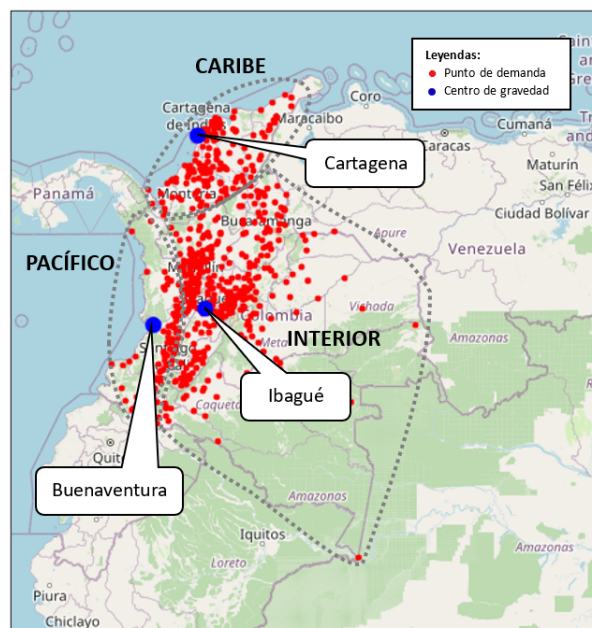


Figure 7: Localización de los CEDIS a nivel regional.
Fuente: Los autores con el uso del lenguaje Python.

4 Discusión

A raíz del crecimiento en los índices de impacto y frecuencia de desastres naturales, resultan cruciales los esfuerzos por mejorar en la eficiencia y efectividad de los procesos en la gestión de desastres y la LH, especialmente, en ámbitos estratégicos como el diseño de cadenas de suministro humanitarias. Al respecto, este estudio se enfocó en decisiones de localización de centros de distribución enmarcados en los momentos *ex ante* a la ocurrencia del desastre, como parte del diseño de redes logísticas. El método del centro de gravedad ha sido utilizado en el contexto colombiano, considerando registros históricos de desastres, para estimar la mejor localización, concéntrica en términos geográficos, de demanda y de costos, para sugerir las coordenadas correspondientes al punto pivote que se demarca en el territorio nacional. En vista de las dificultades que implicaría abarcar distancias considerables en el país, se ha sugerido además una política descentralizada del sistema, de modo que se zonifica el territorio en tres regiones con igual número de centros de gravedad para los CEDIS, a fin de potenciar la cobertura y agilidad del sistema.

Los temas tratados en este estudio son concordantes con los intereses expuestos por diversos autores en la literatura especializada. Anteriormente, Ukkusuri y Yushimito (2008) habían discutido asuntos relacionados con el ruteo y la localización en el ámbito humanitarios respecto del preposicionamiento estratégico de los inventarios. Posteriormente, Richardson et al. (2016) desarrollan el método cualitativo Delphi para generar un ordenamiento jerarquizado acerca de los factores que repercuten en las decisiones de localización y preposicionamiento en el sector humanitario. Asimismo, autores como Paul y MacDonald (2016), Gu et al. (2018), Tavana et al. (2018), y Paul y Wang (2019) desarrollan e implementan modelos de decisión alternativos para la localización de diversos tipos de instalaciones (como refugios, centros de distribución y centros médicos) tanto en momentos *ex ante* como *ex post* para diversos tipos de desastres. Con lo cual se hace explícito el interés desde el ámbito académico por abordar estas problemáticas y sugerir medios de decisión en los niveles estratégicos para la toma de decisiones en la LH.

También se han divulgado casos de estudio en la literatura. Para mencionar algunos, se tienen los trabajos de Salman y Yücel (2014) quienes estudian la localización de instalaciones de emergencia considerando el caso de Estambul, en Turquía. Kilci et al. (2015) exponen la localización de albergues temporales en momentos *ex post* a desastres por terremotos, también en Turquía. Por otra parte, Hadiguna et al. (2014) proponen un mecanismo de apoyo a las decisiones para la evaluación de la localización para los procesos de evacuación, tomando a Indonesia como estudio de caso. Mientras que Rancourt et al. (2015) abordan las decisiones de localización basados en la planificación de la red de distribución de alimentos en Kenia. Cotes y Cantillo (2019) abordan, para el caso de la región caribe de Colombia, el problema de localización de inventarios *ex ante* para desastres relacionados con inundaciones. Nuestro trabajo exhorta la importancia de las decisiones estratégicas de localización de instalaciones, ubicación de inventarios y preposicionamiento durante la fase de preparación en el caso colombiano, al incluir todo el territorio, y promoviendo un esquema descentralizado que permita una posible concentración de recursos para la atención de desastres de acuerdo con las particularidades en cada región. Al respecto, nuestros resultados pueden demarcar una base para el derrotero de decisiones que, sustentada en la definición de una política pública a nivel nacional, logre sugerir los sitios de mayor relevancia estratégica para la ubicación de CEDIS humanitarios que garanticen el envío agilizado a las zonas de desastre. Bajo la perspectiva de la descentralización se podría consolidar un esquema de tres CEDIS regionales para atender a las poblaciones más vulnerables en el caso estudiado, a partir de la siguiente configuración regional:

- Región Norte, o Caribe: en Cartagena (Bolívar);
- Región Occidente, o Pacífico: en Buenaventura (Valle del Cauca); y
- Región Interior: en Ibagué (Tolima).

Entorno a las estrategias para el diseño de las redes de abastecimiento humanitarias, hemos abordado dos esquemas generales: centralización y descentralización. Estos ya han sido estudiados y discutidos en la literatura especializada en LH. En este sentido, Besiou et al. (2014) abordan en la gestión de programas de desarrollo humanitario haciendo énfasis en flotas de transporte, y resaltan la bondad de la centralización para disminuir los costos totales, no obstante, que la descentralización favorece el nivel de servicio. Aros y Gibbons (2018) reconocen que centralizar la información puede retardar la culminación de tareas de respuesta a los desastres. Trecarichi et al. (2010) comparan esquemas alternativos de centralización y descentralización en el problema de distribución de ayudas humanitarias. Sus resultados muestran una llamativa similitud en el desempeño logrado por ambos escenarios. Mientras que, Muggy y Stamm (2017) resaltan el impacto positivo de la descentralización en la localización de centros prestadores de salud para condiciones *post* desastre. En nuestro trabajo, la perspectiva descentralizada del sistema de distribución se fundamenta en la posibilidad de mejorar la cobertura y tiempos de respuesta dadas las condiciones geográficas y de extensión del territorio que posee el caso estudiado. En un sentido práctico, se plantea para que en Colombia el SNGRD implemente un esquema descentralizado en el diseño de redes de distribución humanitarias. Ello implicará la toma de decisiones clave que, en consideración de lo sugerido por Gattorna (2010), y De Villiers et al. (2017), representará la estrategia base para el funcionamiento del sistema logístico. Estas decisiones, de acuerdo con los autores citados, deberán tomarse en los siguientes términos:

- Estrategias de aprovisionamiento/reaprovisionamiento de los CEDIS;
- Enfoque de la cadena de abastecimiento: lean vs agile; y
- Nivel de flexibilidad del sistema de abastecimiento.

Lo anterior responderá a políticas públicas que a nivel nacional deberán abordarse de acuerdo con las capacidades actuales, así como el interés por mejorar el desempeño logístico nacional en pro de favorecer las comunidades que cohabitan en el territorio.

Como se ha mencionado, la LH representa un campo de alto interés y desarrollo investigativo, en el que se busca aportar mecanismos de decisión a nivel estratégico, táctico y operativo para mejorar el desempeño de los sistemas humanitarios. Nuestro trabajo busca aportar al cuerpo del conocimiento en lo concerniente a las decisiones estratégicas de localización de instalaciones clave, mediante el método del centro de gravedad, para determinar puntos de acopio y distribución de ayuda en la respuesta a desastres. No obstante, el trabajo aquí presentado posee algunas limitaciones. En primer lugar, se reconoce el ámbito del caso abordado, ya que se ha centrado en tomar y consolidar la información global de Colombia, lo cual limita el alcance de nuestro estudio a los datos obtenidos para este país. Frente a esto, futuras investigaciones podrían centrarse en otros casos de Latinoamérica, al incorporar las condiciones y particularidades de los diversos países. Por otro lado, los datos trabajados aquí poseen un margen estrecho de tiempo según se ha descrito en el método aplicado. Surge entonces la posibilidad que futuros estudios utilicen registros de nuevos desastres, e inclusive, cada estudio adicional implicará acceder a bases de datos diferentes, sean ellos de carácter nacional o internacional. Finalmente, este trabajo estuvo limitado a un eslabón particular en la cadena logística humanitaria: los CEDIS que se dinamizan principalmente en momentos ex ante a la ocurrencia de los desastres, y que se dedican al preposicionamiento de recursos humanitarios como los alimentos de primera necesidad. Al respecto, se plantea como oportunidad para el desarrollo de nuevos trabajos, abordar decisiones complementarias para la localización durante los momentos ex post (fase de respuesta) del ciclo del manejo de desastres. Con ello se buscaría abordar eslabones intermedios de la cadena logística, junto con el problema de la distribución de última milla en zonas de desastre.

5 Conclusión

El objetivo de este trabajo estuvo dirigido a la aplicación del método del centro de gravedad en la definición de centros de distribución, como decisión estratégica de diseño, para cadenas logísticas humanitarias en el caso colombiano. Hemos obtenido las coordenadas y municipios correspondientes a la decisión de dónde localizar CEDIS humanitarios a partir de dos alternativas de diseño: esquema centralizado y descentralizado de la red de distribución. Estos esquemas, como se indicó, ya han sido estudiados y discutidos en la literatura especializada en el campo de la LH. La metodología aplicada en el caso particular puede convertirse en insumo importante para la toma de decisiones y el establecimiento de políticas públicas encaminadas al diseño y localización de centros de distribución de ayuda humanitaria en la fase crítica de la preparación de desastres. Nuestros resultados permiten sugerir la descentralización para proceder, desde el sector práctico, con la localización de instalaciones humanitarias. Otros esfuerzos podrían dirigirse hacia la localización de puntos de atención inmediata y problemas de distribución de última milla en la respuesta de futuros desastres. El compromiso de las agencias humanitarias y gobiernos locales será esencial para la aplicación práctica de los desarrollos y propuestas que se plantean en los sectores académico-investigativos. Si bien la LH y el manejo de desastres siguen siendo áreas en pleno desarrollo, pero que también están plagados de retos actuales y futuros, resulta evidente que su discusión continúa abierta. El mejoramiento de políticas públicas aparece como una necesidad de desarrollo para las poblaciones de países de bajos y medianos ingresos, como en el caso de América Latina.

6 Referencias bibliográficas

- Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175 (1), 475-493. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.016>
- Aros, S. K., & Gibbons, D. E. (2018). Exploring communication media options in an inter-organizational disaster response coordination network using agent-based simulation. *European Journal of Operational Research*, 269 (2), 451-465. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.02.013>
- Balcik, B., Beamon, B. M., Krejci, C. C., Muramatsu, K. M., & Ramirez, M. (2010). Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities. *International Journal of Production Economics*, 126 (1), 22-34. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.09.008>
- Banco Mundial. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco Mundial Colombia, Bogotá.

- Baskaya, S., Ertem, M. A., & Duran, S. (2017). Pre-positioning of relief items in humanitarian logistics considering lateral transshipment opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 57, 50-60. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2016.09.001>
- Besiou, M., Pedraza-Martinez, A. J., & Van Wassenhove, L. N. (2014). Vehicle Supply Chains in Humanitarian Operations: Decentralization, Operational Mix, and Earmarked Funding. *Production and Operations Management*, 23 (11), 1950-1965. Doi: <https://doi.org/10.1111/poms.12215>
- Bhattacharya, S., Hasija, S., & Van Wassenhove, L. N. (2014). Designing Efficient Infrastructural Investment and Asset Transfer Mechanisms in Humanitarian Supply Chains. *Production and Operations Management*, 23 (9), 1511-1521. Doi: <https://doi.org/10.1111/poms.12177>
- Caunhye, A. M., Zhang, Y., Li, M., & Nie, X. (2016). A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 90, 161-176. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.10.011>
- Chakravarty, A. K. (2014). Humanitarian relief chain: Rapid response under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 151 (1), 146-157. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.10.007>
- Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2009). *Administración de Operaciones: Producción y Cadena de Suministros*. Duodécima edición. México: McGraw-Hill.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro: Estrategia, planeación y operación*. Tercera edición. México: Pearson Educación.
- Cotes, N., & Cantillo, V. (2019). Including deprivation costs in facility location models for humanitarian relief logistics. *Socio-Economic Planning Sciences*, 65, 89-100. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.03.002>
- Day, J. M. (2014). Fostering emergent resilience: the complex adaptive supply network of disaster relief. *International Journal of Production Research*, 52 (7), 1970-1988. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.787496>
- Day, J. M., Melnyk, S. A., Larson, P. D., Davis, E. W., & Whybark, D. C. (2012). Humanitarian and disaster relief supply chains: a matter of life and death. *Journal of Supply Chain Management*, 48 (2), 21-36. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2012.03267.x>
- De Villiers, G., Nieman, G., & Niemann, W. (2017). *Strategic logistics management: A supply management approach*. Segunda edición. Pretoria: Van Schaik Publishers.
- Garrido, R. A., Lamas, P., & Pino, F. J. (2015). A stochastic programming approach for floods emergency logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 18-31. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.12.002>
- Gattorna, J. (2010). *Dynamic Supply Chains: Delivering Value Through People*. Segunda edición. Londres: Pearson educación.
- Gavidia, J. V. (2017). A model for enterprise resource planning in emergency humanitarian logistics. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 7 (3), 246-265. Doi: <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-02-2017-0004>
- Gu, J., Zhou, Y. J., Das, A., Moon, I., & Lee, G. M. (2018). Medical relief shelter location problem with patient severity under a limited relief budget. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 720-728. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.027>
- Hadiguna, R. A., Kamil, I., Delati, A., & Reed, R. (2014). Implementing a web-based decision support system for disaster logistics: A case study of an evacuation location assessment for Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 9, 38-47. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.02.004>
- Hardoy, J., & Velásquez, L. S. (2014). Re-thinking "Biomanizales": addressing climate change adaptation in Manizales, Colombia. *Environment and Urbanization*, 26 (1), 53-68. Doi: <https://doi.org/10.1177/0956247813518687>
- Hasanzadeh, H., & Bashiri, M. (2016). An efficient network for disaster management: Model and solution. *Applied Mathematical Modelling*, 40 (5-6), 3688-3702. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.113>

- Heizer, J., & Render, B. (2007). Dirección de la producción y de operaciones: Decisiones estratégicas. Octava edición. Madrid: Pearson Educación.
- IDEAM, & UNAL. (2018). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM; Universidad Nacional de Colombia – UNAL, Bogotá.
- Kilci, F., Kara, B. Y., & Bozkaya, B. (2015). Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey. *European Journal of Operational Research*, 243 (1), 323-332. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.035>
- Kovács, G., & Spens, K. M. (2009). Identifying challenges in humanitarian logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39 (6), 506-528. Doi: <https://doi.org/10.1108/09600030910985848>
- Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2008). Administración de operaciones: Procesos y cadenas de valor. Octava edición. México: Pearson educación.
- Kunz, N., Reiner, G., & Gold, S. (2014). Investing in disaster management capabilities versus pre-positioning inventory: A new approach to disaster preparedness. *International Journal of Production Economics*, 157, 261-272. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.11.002>
- Liu, Y., & Guo, B. (2014). A Lexicographic Approach to Postdisaster Relief Logistics Planning Considering Fill Rates and Costs under Uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Número de artículo: 939853, 17 páginas. Doi: <https://doi.org/10.1155/2014/939853>
- Mohan, S., Gopalakrishnan, M., & Mizzi, P. J. (2013). Improving the efficiency of a non-profit supply chain for the food insecure. *International Journal of Production Economics*, 143 (2), 248-255. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.05.019>
- Muggy, L., & Stamm, J. L. H. (2017). Dynamic, robust models to quantify the impact of decentralization in post-disaster health care facility location decisions. *Operations Research for Health Care*, 12, 43-59. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2017.01.002>
- Nikbakhsh, E. & Farahani, R. Z. (2011). Humanitarian Logistics Planning in Disaster Relief Operations. En Farahani, R. Z., Rezapour, S., & Kardar, L. (Eds.), *Logistics Operations and Management: Concepts and Models*. Amsterdam: Elsevier. pp. 291-332. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385202-1.00015-3>
- Ozdamar, L. (2011). Planning helicopter logistics in disaster relief. *OR Spectrum*, 33 (3), 655-672. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00291-011-0259-y>
- Paul, J. A., & MacDonald, L. (2016). Location and capacity allocations decisions to mitigate the impacts of unexpected disasters. *European Journal of Operational Research*, 251 (1), 252-263. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.028>
- Paul, J. A., & Wang, X. F. (2019). Robust location-allocation network design for earthquake preparedness. *Transportation Research Part B: Methodological*, 119, 139-155. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.11.009>
- PNUD. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011 – 2100. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD Colombia, Bogotá.
- Powell, J. H., Mustafee, N., Chen, A. S., & Hammond, M. (2016). System-focused risk identification and assessment for disaster preparedness: Dynamic threat analysis. *European Journal of Operational Research*, 254 (2), 550-564. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.037>
- Rancourt, M. E., Cordeau, J. F., Laporte, G., & Watkins, B. (2015). Tactical network planning for food aid distribution in Kenya. *Computers & Operations Research*, 56, 68-83. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.10.018>
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Bozorgi-Amiri, A. (2016). An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 201-215. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.014>
- Richardson, D. A., De Leeuw, S., & Dullaert, W. (2016). Factors Affecting Global Inventory Prepositioning Locations in Humanitarian Operations – A Delphi Study. *Journal of Business Logistics*, 37 (1), 59-74. Doi: <https://doi.org/10.1111/jbl.12112>

- Rodríguez-Espíndola, O., Albores, P., & Brewster, C. (2018). Dynamic formulation for humanitarian response operations incorporating multiple organisations. *International Journal of Production Economics*, 204, 83-98. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.023>
- Rodríguez-Espíndola, O., & Gaytán, J. (2015). Scenario-based preparedness plan for floods. *Natural Hazards*, 76 (2), 1241-1262. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1544-2>
- Salman, F. S., & Yücel, E. (2015). Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case. *Computers & Operations Research*, 62, pp. 266-281. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.015>
- Sarache, W., & Morales, M. M. (2016). Localización, transporte e inventarios: tres decisiones estructurales en el diseño de cadenas de abastecimiento. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Sharif, M. T., & Salari, M. (2015). A GRASP algorithm for a humanitarian relief transportation problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, 259-269. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.02.013>
- Simple Maps. (2023). World Cities Database. Simple Maps Interactive Maps & Data, Cincinnati.
- Tavana, M., Abtahi, A. R., Di Caprio, D., Hashemi, R., & Yousefi-Zenouz, R. (2018). An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 64, 21-37. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.12.004>
- Trecarichi, G., Rizzi, V., Marchese, M., Vaccari, L., & Besana, P. (2010). Enabling information gathering patterns for emergency response with the OpenKnowledge system. *Computing and Informatics*, 29 (4), 537-555.
- Ukkusuri, S. V., & Yushimito, W. F. (2008). Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem. *Transportation Research Record*, 2089, 18-25. Doi: <https://doi.org/10.3141/2089-03>
- UNGRD. (2013). Estandarización de Ayuda Humanitaria de Colombia. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá.
- UNGRD. (2014). Documento de priorización de líneas estratégicas y zonas de intervención en gestión del riesgo de desastres en Colombia. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá.
- UNGRD. (2016). Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres: Una estrategia de desarrollo 2015-2025. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá.
- UNGRD. (2022). Emergencias UNGRD. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá.