

# Desarrollo de un modelo matemático de logística humanitaria con resiliencia para la gestión del riesgo en sismos y terremotos en Cáqueza, Cundinamarca

*Development of a mathematical model of logistics humanitarian assistance with resilience to risk management in earthquakes and earthquakes in Caqueza, Cundinamarca*

*Desenvolvimento de um modelo matemático de logística humanitária com resiliência para a gestão do risco em sismos e terremotos em Cáqueza, Cundinamarca*

Eduardo Barragán-Acevedo<sup>1</sup>  
Ludwig Ben Roald Castañeda<sup>2</sup>  
Ever Ángel Fuentes<sup>3</sup>

**Recibido:** agosto 10 del 2018

**Aprobado:** noviembre 30 del 2018

**Disponible en línea:** enero 15 del 2019

#### **Cómo citar este artículo:**

E. Barragán-Acevedo, L. B. R. Castañeda, E. Á. Fuentes, “Desarrollo de un modelo matemático de logística humanitaria con resiliencia para la gestión del riesgo en sismos y terremotos en Cáqueza, Cundinamarca”, *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 25, n.º 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2019.01.02>

---

Artículo de investigación. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2019.01.02>

<sup>1</sup> Universidad Libre, Bogotá, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0350-2586>

Correo electrónico: josee.barragana@unilibrebog.edu.co

<sup>2</sup> Universidad Libre, Bogotá, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7504-5164>

<sup>3</sup> Universidad Libre, Bogotá, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7504-5164>

Correo electrónico: ever.fuentes@unilibre.edu.co

## Resumen

*Introducción:* el artículo es producto de la investigación “Desarrollo de un modelo matemático de logística humanitaria con resiliencia para la gestión del riesgo en sismos y terremotos en Cádiz, Cundinamarca”, desarrollada durante los años 2017 y 2018 en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Libre en Colombia.

*Problema:* el municipio de Cádiz, dadas sus características geográficas, presenta vulnerabilidad ante sismos, y no cuenta con un plan logístico posdesastre acorde a las necesidades de riesgo de sus habitantes.

*Objetivo:* desarrollar un modelo matemático de logística humanitaria con resiliencia para la gestión del riesgo en sismos en Cádiz, Cundinamarca.

*Metodología:* diagnóstico y medición del índice de resiliencia comunitaria en Cádiz, para proponer un modelo de logística humanitaria, se describen los parámetros, variables y restricciones, y se valida a través de herramientas informáticas como Open Solver y Promodel.

*Resultados:* se desarrolló un modelo logístico humanitario que responde a la realidad del municipio determinando la manera óptima de transportar, almacenar y distribuir suministros a una población con demanda resiliente.

*Conclusión:* se genera una herramienta que dota a la comunidad de Cádiz de un modelo logístico posdesastre acorde a sus características y necesidades, que le permita reaccionar para disminuir la tasa de mortalidad ante un sismo.

*Originalidad:* aplicación de la resiliencia al escenario de la gestión del riesgo, con incorporación de las características de la comunidad a los modelos matemáticos de logística humanitaria.

*Limitaciones:* el modelo propuesto se soluciona a partir de programación lineal y no tiene en cuenta variables de tipo probabilístico.

**Palabras clave:** logística humanitaria, resiliencia, modelo matemático, flexibilidad de aplicación, gestión del riesgo.

## Abstract

*Introduction:* the article is the product of the research “Development of a mathematical model of humanitarian logistics with resilience for risk management in earthquakes and earthquakes in Cádiz, Cundinamarca”, developed during 2017 and 2018, in the Faculty of Industrial Engineering of the University Free in Colombia.

*Problem:* the municipality of Cádiz, due to its geographical characteristics, presents vulnerability to earthquakes and does not have a post-disaster logistic plan in accordance with the risk needs of its inhabitants.

*Objective:* to develop a mathematical model of humanitarian logistics with resilience for risk management in earthquakes in Cádiz, Cundinamarca.

*Methodology:* diagnosis and measurement of the community resilience index in Cádiz to propose a model of humanitarian logistics. The parameters, variables and restrictions are described and validated through computer tools such as Open Solver and Promodel.

*Results:* a humanitarian logistic model was developed that responds to the reality of the municipality by determining the ideal way to transport, store and distribute provisions to a population with resilient demand.

*Conclusion:* a tool is generated that provides the Cádiz community with a post-disaster logistic model according to their characteristics and needs, which allows them to react to reduce the mortality rate in the event of an earthquake.

*Originality:* application of resilience in the risk management scenario, with the incorporation of the characteristics of the community to the mathematical models of humanitarian logistics.

*Limitations:* the proposed model is solved from linear programming and does not take into account probabilistic variables.

**Key words:** Humanitarian logistics, resilience, mathematical model, application flexibility, risk management.

## Resumo

*Introdução:* o artigo é produto da pesquisa "Desenvolvimento de um modelo matemático de logística humanitária com resiliência para a gestão do risco em sismos e terremotos em Cáqueza, Cundinamarca", desenvolvida durante 2017 e 2018, na Faculdade de Engenharia Industrial da Universidad Libre na Colômbia.

*Problema:* o município de Cáqueza, por suas características geográficas, apresenta vulnerabilidade diante de sismos e não conta com um plano logístico pós-desastre de acordo com as necessidades de risco de seus habitantes.

*Objetivo:* desenvolver um modelo matemático de logística humanitária com resiliência para a gestão do risco em sismos em Cáqueza, Cundinamarca.

*Metodologia:* diagnóstico e medição do índice de resiliência comunitária em Cáqueza para propor um modelo de logística humanitárias. Os parâmetros, as variáveis e as restrições são descritos e validados por meio de ferramentas informáticas como Open Solver e Promodel.

*Resultados:* desenvolveu-se um modelo logístico humanitário que responde à realidade do município determinando a maneira ideal de transportar, armazenar e distribuir provisões a uma população com demanda resiliente.

*Conclusão:* gera-se uma ferramenta que dota a comunidade de Cáqueza de um modelo logístico pós-desastre de acordo com suas características e necessidades, que permita reagir para diminuir a taxa de mortalidade diante de um sismo.

*Originalidade:* aplicação da resiliência no cenário da gestão do risco, com incorporação das características da comunidade aos modelos matemáticos de logística humanitária.

*Limitações:* o modelo proposto é solucionado a partir de programação linear e não leva em consideração variáveis de tipo probabilístico.

**Palavras-chave:** Logística humanitária, resiliência, modelo matemático, flexibilidade de aplicação, gestão do risco.

# 1. Introducción

Desde sus inicios, la humanidad ha sido partícipe y damnificada de un sin número de eventualidades no deseadas que, con el tiempo y debido a la afectación que causaban, adquirieron el nombre de desastre que, según la OPS [1], se define como una situación catastrófica producida por un evento natural (terremoto, erupción volcánica, huracán, deslave, grandes sequías, etc.), accidente tecnológico (ejemplo: explosión en una industria) o directamente provocada por el hombre (conflicto armado, ataque terrorista, accidentes por error humano, etc.) en la que se ve amenazada la vida de

las personas o su integridad física y/o se producen muertes, lesiones, destrucción y pérdidas materiales, así como sufrimiento humano.

En una perspectiva mundial, durante los últimos años los desastres han incrementado en diversidad, frecuencia y severidad, según [2], solamente en el 2010, 640 catástrofes de formas e intensidades variadas ocurrieron alrededor del mundo, ocasionando cerca de 300.000 muertes y daños económicos evaluados en 123,3 billones de dólares. Ahora bien, observando este tipo de fenómenos desde una visión más específica, la extensa diversidad en todos los ambientes geográficos, no solo hacen de Colombia un territorio rico en recursos naturales, sino que, desde que se ha podido registrar y codificar información, el territorio nacional ha sido afectado por inundaciones, sequías, movimientos sísmicos, vulcanismo, avalanchas y derrumbes, que lo convierten en una zona con gran variedad y frecuencia de eventos indeseados que terminan por afectar negativamente a las comunidades.

Sumado a lo anterior, el cambio climático y la contaminación de los recursos naturales, provocan que en la actualidad todos estos fenómenos se agudicen y tengan un incremento significativo de víctimas y daños materiales, lo que hace patente la necesidad de desarrollar programas que gestionen efectivamente el riesgo ante cualquier tipo de desastres. Para ello las organizaciones mundiales, sobre todo de tipo humanitario, necesitan el apoyo de nuevas tecnologías e instrumentos aplicados de disciplinas ya existentes, y en ocasiones enfocadas en áreas totalmente diferentes, que les brinden una salida técnica viable a vacíos conceptuales y de aplicación, que permitan hacer más eficiente y efectiva la atención a damnificados en la segunda fase propuesta por Kovács y Spens [3], o posdesastre.

La logística, y su enfoque en la administración sobre la cadena de suministro, específicamente en cuanto a temas de ubicación de instalaciones y distribución de mercancía, se ha visto aplicada en este tipo de escenarios a partir de la evidente necesidad de obtener una manera práctica de almacenar, transportar y distribuir productos a través de una red que permita a los damnificados adquirir víveres, medicamentos y elementos de primera necesidad con rapidez y eficiencia. Para ello, diversos autores han llevado a cabo estudios con la aplicación de modelos matemáticos, que varían desde Haghani y Oh [4] con programación lineal, hasta Tzeng [5], con metodología fuzzy de objetivos múltiples, donde el análisis se ve guiado hacia la búsqueda de una disciplina de mayor avance que permita no solo el estudio de problemas con mayor número de nodos, variables, parámetros, etc., sino que admita la validación de datos probabilísticos y estocásticos [6].

Sin embargo, este esfuerzo ha dejado un poco relegados otros aspectos importantes de la población que harían al modelo más real y ligado a las verdaderas

condiciones y características de las comunidades, de esta manera, se hace vital la inclusión de nuevas herramientas dentro del diseño de los modelos matemáticos de logística humanitaria, como es el caso de la resiliencia.

La resiliencia es un término usado en la antigüedad para referirse a la capacidad de rebote o reánimo de determinados objetos, y que, como producto de su adaptación a diferentes ciencias, como la metalurgia y la ecología, se aplicó para describir el comportamiento de objetos o ecosistemas que pese a ser impactados por fuerzas o cambios drásticos poseían la facultad de adaptarse y volver a su estado inicial. A partir de la década de los ochenta, diversos autores como Luthar y Cicchetti [7] cambiaron su concepción y la aterrizaron al contexto de las ciencias sociales, y la definieron como un proceso dinámico que tiene como resultado la adaptación positiva de personas en contextos de gran adversidad, como la pobreza y la drogadicción.

En su enfoque más actualizado, a estas problemáticas se le suman otro tipo de entornos, como los desastres naturales, lo que provoca un análisis colectivo a partir de la denominada resiliencia comunitaria, definida en [8] como la capacidad del sistema social y de las instituciones para hacer frente a las adversidades y para reorganizarse de modo que mejoren sus funciones, su estructura y su identidad. Basados en esta nueva ola de estudio, diversos autores, como Twigg [9], establecieron una serie de componentes o áreas temáticas que permiten caracterizar el nivel de resiliencia, ante desastres, en que se encuentra determinada población.

Apoiado en lo anterior, el presente artículo da a conocer un ejemplo práctico de la aplicación de la ingeniería industrial al escenario del posdesastre, a partir de la descripción detallada del diseño y validación de un modelo matemático de logística humanitaria basado en el índice de resiliencia comunitaria, que permita dotar a las organizaciones humanitarias y gubernamentales de un instrumento de planificación eficiente y acorde a las características de la población, y que en momentos de incertidumbre, se vea reflejado en disminución de vulnerabilidad y mejora de la calidad de vida de los habitantes.

## 2. Antecedentes de investigación

### 2.1 Logística humanitaria

El aumento en la frecuencia de ocurrencia de desastres naturales y su impacto a nivel social y económico ha incentivado mundialmente estudios en distintas áreas del conocimiento con múltiples aplicaciones, lo cual muestra un interés de varios investigadores por vincularse a la logística humanitaria, tal es el caso de Salazar, Cavazos

y Vargas [10], quienes destacan la importancia de la logística humanitaria en el contexto actual, pues afirman que los impactos que generan los desastres naturales en países en desarrollo y en comunidades pobres son mayores, lo cual hace que la etapa de reconstrucción y adaptación en un escenario posdesastre tenga una mayor complejidad. Sheppard, Tatham, Fisher y Gapp [11] han logrado identificar cómo las poblaciones locales, particularmente en los municipios y villas, pueden mejorar su capacidad de preparación y respuesta mucho más eficiente y eficazmente para los desafíos logísticos que ellos tienen que enfrentar a causa de un desastre natural. Safeer, Anbuudayasankar, Balkumar y Ganesh [12] argumentan que gracias a la experiencia que diferentes organismos humanitarios han tenido a lo largo de la historia con su participación en el apoyo poscatástrofe, realizan una mirada holística de este servicio y caracterizan el proceso desde la definición de conceptos hasta el discernimiento de elementos fundamentales en el apoyo humanitario.

## 2.2 Resiliencia

Como se señala en [13], los estudios sobre resiliencia, aún son escasos en el contexto internacional pero han ido aumentando a medida que se descubre el potencial del concepto para explicar e intervenir ciertos fenómenos de la realidad social.

Ruiz [14] enfatiza en la característica que las personas deben adoptar ante una respuesta de resistencia, absorción, acomodación y/o recuperación ante eventos no deseados causados o no por el hombre a lo largo del tiempo, la cual es la resiliencia en su entorno comunitario, dado que el desarrollo de la misma les permite a las sociedades vulnerables superar y aprender de diferentes experiencias traumáticas en las que se pueden ver comprometidas en un determinado momento. Es decir, que a nivel colectivo, la resiliencia comunitaria es uno de los mecanismos que se asocia con el afrontamiento efectivo de algunas situaciones adversas, como: los desastres naturales (Cohen, Leykin, Lahad, Goldberg y Aharanson [15]), Joerin, Shaw, Takeuchi y Krishnamurti [16], el deterioro y la crisis económica (Skerrat [17]), los cambios políticos y sociales (Wilson [18]), los cambios ambientales (Lange, Kramer y Faber [19], Suárez-Ojeda [20]) o los eventos traumáticos puntuales o crónicos que amenazan seriamente la existencia y estabilidad de las comunidades (Páez [21]) [14].

Según un estudio realizado por Campo *et al.* [22], en el cual se analizan las investigaciones elaboradas en Colombia sobre resiliencia, en su mayoría se relacionan con disciplinas como la psicología y la pedagogía, es por esta razón, que además de plantear a la resiliencia como un factor diferenciador del presente estudio, se busca transformar su enfoque hacia otras áreas del saber cómo la gestión del riesgo de desastres.

### 3. Descripción del problema

Cáqueza es un municipio del departamento de Cundinamarca, capital de la Provincia de Oriente, situado a 39 kilómetros del área metropolitana de Bogotá y a 50 km de la ciudad de Villavicencio, cuenta con una extensión territorial de área urbana de 38 km<sup>2</sup> aproximadamente y con una población de 17.200 habitantes [23].

A pesar de ser un municipio que goza de una ubicación privilegiada, según el servicio geológico colombiano y la Revista Colombiana de Geografía [24], Cáqueza se ha visto afectado por eventos sísmicos en los años 1743, 1785, 1917, 1966 y 2005 (epicentro en Quetame, Cundinamarca), los cuales ocasionaron daños notables sobre su infraestructura física y un impacto negativo en el medio ambiente.

Este historial indica la existencia de una amenaza sísmica, sumado a que, según el Círculo Nacional de Auxiliadores Técnicos (CINAT), a través del doctor Luis Galindo Díaz, Cáqueza se encuentra en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes y las zonas dentro de este espacio o aledañas son propensas a movimiento telúricos de gran magnitud ocasionando daños a nivel social, económico y ambiental.

Estos puntos requieren de una preparación y capacidad de reacción a nivel estructural, pues son elementos importantes para contrarrestar los efectos negativos que un desastre natural trae consigo mismo. Lamentablemente, el nivel de desarrollo en vías y vivienda del objeto de estudio no son apropiadas para las características del espacio en que se encuentra ubicado como se observa en las fotografías de la tabla 1.

Esta problemática se agudiza en poblaciones cuya gestión integral del riesgo no es coherente con las características y necesidades reales de estas, como es el caso de Cáqueza, donde se hace evidente la falta de organización y coordinación por parte de organismos administrativos y gubernamentales, en temas de vital importancia, como la construcción y socialización de programas encaminados a la prevención, mitigación y control de riesgos de desastres naturales.

Otra situación problema identificada es la presencia de un sistema logístico en el municipio que no responde satisfactoriamente ante la manifestación de alguna emergencia o desastre natural, pues, la población no lo conoce y su participación en las campañas de divulgación e instrucción es muy baja. Siendo Cáqueza un municipio con altas probabilidades de sufrir un desastre natural, el perfil de respuesta debería ser distinto al que se muestra en la tabla 2, que es el resultado de la aplicación de la encuesta y permite evidenciar la preparación ciudadana y la acogida que tienen los planes en el municipio.

**Tabla 1.** Registro fotográfico de calles, viviendas y geografía del municipio de Cáqueza

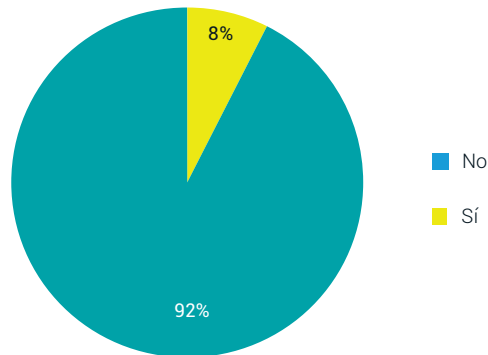


**Fuente:** elaboración propia

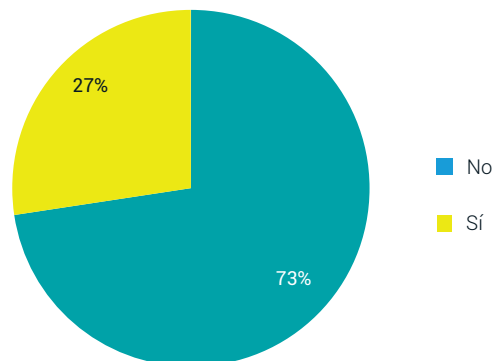


**Tabla 2.** Opinión de los habitantes del municipio

| <b>3. ¿Se ha comunicado en algún momento un plan de logística a nivel municipal?</b> | <b>Frecuencia</b> | <b>Porcentaje</b> |
|--|-------------------|-------------------|
| NO   | 172               | 92,5%             |
| Sí   | 14                | 7,5%              |
| <b>TOTAL</b>   | <b>186</b>        |                   |

**Comunicación de los planes logísticos**

| <b>2. ¿Ha participado en algún tipo de capacitación en prevención y atención a emergencias en el último año?</b> | <b>Frecuencia</b> | <b>Porcentaje</b> |
|--|-------------------|-------------------|
| NO   | 135               | 72,6%             |
| Sí   | 51                | 27,4%             |
| <b>TOTAL</b>   | <b>186</b>        |                   |

**Participación en capacitaciones en prevención y atención de desastres**

**Fuente:** elaboración propia

El desarrollo de planes efectivos que contribuyan a la operación del escenario posdesastre es fundamental para la planificación, ejecución y control de emergencias, que como resultado final facilite a un gran número de habitantes vulnerables, la adaptación a un escenario adverso y por lo tanto les permita tener más posibilidades de sobrevivir y recuperar su entorno de vida.

## 4. Metodología

Se realizó un diagnóstico de la situación del municipio en materia de planes de logística, conocimiento de la población y factores influyentes en la adaptación y atención de un sismo a partir de una encuesta aplicada a los habitantes y entrevistas realizadas a los entes gubernamentales. Se estableció el índice de resiliencia comunitario, donde se cuantificó de 1 a 5 los factores más importantes de la gestión y reducción del riesgo de desastres.

Con la información procesada, se plantea el modelo logístico propuesto, que contempló los principales aspectos en un escenario posdesastre, como el análisis de la demanda (cuyo componente esencial es el índice de resiliencia), distribución, transporte y manejo de inventarios de la ayuda humanitaria. El modelo se validó a través del uso de herramientas informáticas, como Open Solver, para solucionar el modelo de inventarios y transporte, y Promodel, para simular la distribución.

Finalmente, se realizó la evaluación social de la investigación que, dado su alcance y finalidad multicriterio, valora aspectos de carácter económico, social, técnico e institucional.

## 5. Desarrollo de la investigación

Para poder generar planes, recomendaciones y modelos logísticos con resiliencia se debe realizar una mirada introspectiva y conocer los factores claves que permitan diagnosticar, caracterizar y evaluar a la población. Para ello se diseñó un cuestionario homogéneo de 30 preguntas abiertas y cerradas que se aplicó cara a cara entre el encuestador y el encuestado.

Se procedió a realizar la estimación de la muestra de una población de 17.200 habitantes entre hombres y mujeres de todas las edades, que habitan tanto en el área rural como urbana, basándose en las proyecciones del DANE [30] del censo de 2017, a partir del "Método de relación de cohortes", se seleccionó una muestra de 186 habitantes de la cabecera municipal, con un nivel de confianza del 95% y un error muestral de +/- 6%.

El producto de este estudio de campo fue la tabulación, recolección e identificación del perfil estratégico del municipio junto con sus principales problemas, los cuales fueron datos clave que permitieron plantear herramientas diagnósticas recomendadas por Pahl y Richter [25], Franklin en su libro *Auditoría administrativa* [26] y el repositorio de la U. Distrital [27] las cuales fueron:

- Matriz DOFA
- Matriz EFE y EFI
- Matriz PEYEA
- Matriz de Impacto Cruzado

Y como fruto de la ejecución de las herramientas mencionadas, el cual fue el foco principal para el diseño y desarrollo del modelo logístico con resiliencia, se presenta la tabla 3, llamada de esta forma dado que la matriz de impacto cruzado clasifica las problemáticas en distintos grupos y resalta que los puntos de mayor impacto se sitúan en los cuadrantes críticos y activos que son resultado de la metodología aplicada, permitiéndole al lector ser partícipe de las problemáticas identificadas por los autores y que fueron destacadas en el estudio de campo y la aplicación de las herramientas diagnóstico.

**Tabla 3. Problemas críticos y activos del municipio**

| Problema | Descripción  |
|----------|--|
| P1       | Comunicación deficiente en el municipio hacia la comunidad en sus planes de gestión del riesgo y logística.                    |
| P4       | La población no está bien preparada y capacitada para reaccionar de forma positiva ante los potenciales riesgos del municipio. |
| P5       | La mayoría de los habitantes de Cáqueza desconoce los puntos de encuentro del municipio.                                       |
| P7       | Poca participación de la población en simulacros.  |
| P8       | Las personas que han participado en alguna capacitación o socialización de información no recuerdan los temas que se trataron. |
| P9       | Falta de interés de la población por mantenerse informada en cuestiones de riesgo.   |
| P10      | Conocimiento insuficiente de la población hacia los organismos humanitarios que operan en el municipio.                        |
| P11      | La mayoría de los habitantes del municipio desconoce las rutas de evacuación del municipio.                                    |
| P12      | La población se encuentra inhabilitada en la contribución eficiente ante una emergencia.                                       |

**Fuente:** elaboración propia

A partir de las problemáticas evidenciadas en la tabla 3, y basado en el modelo de componentes resilientes de Twigg [9], en esta etapa del proyecto se procedió a cuantificar el estado real del municipio frente a la gestión y reducción del riesgo de desastres, para lo cual se elaboró y aplicó el instrumento de medición de resiliencia comunitaria. Con el fin de realizar un análisis integral, se agruparon cada uno de estos componentes en las siguientes áreas temáticas:

- Gobernabilidad: mide la integración y el compromiso de los entes gubernamentales con la generación de políticas, planes y mecanismos que permitan una eficiente respuesta y recuperación posterior a un desastre (componentes 1-5).
- Evaluación del riesgo: la capacidad técnica y la participación de la población para determinar el nivel de vulnerabilidad a los que están expuestos sus habitantes (componentes 6-7).
- Conocimiento y educación: analiza en nivel de conciencia, cultura, actitud y motivación de los habitantes acerca a la gestión del riesgo, además también establece el papel que juega la Alcaldía en capacitación y difusión de información frente a estas temáticas (componentes 8-10).
- Reducción de la vulnerabilidad: evalúa la efectiva gestión de los recursos naturales y financieros que permita la protección física y social de los habitantes en pro de mejorar sus condiciones de salud, seguridad y bienestar (componentes 11-19).
- Preparación y respuesta ante desastres: mide las capacidades de los habitantes y las organizaciones gubernamentales de dar respuesta ante desastres naturales, así como la existencia y utilización del sistema de alerta temprana (componentes 20-25).

Estos factores fueron evaluados a miembros de la Alcaldía y habitantes del municipio, bajo modalidad de respuesta tipo Likert con puntaje de uno a cinco (de menor a mayor calificación). A partir de la información recolectada, se procedió a tabular, ponderar y graficar los datos, resumidos en la figura 1, con la finalidad de obtener el índice de resiliencia de la población, y que para el caso de Cáqueza fue del 53%.

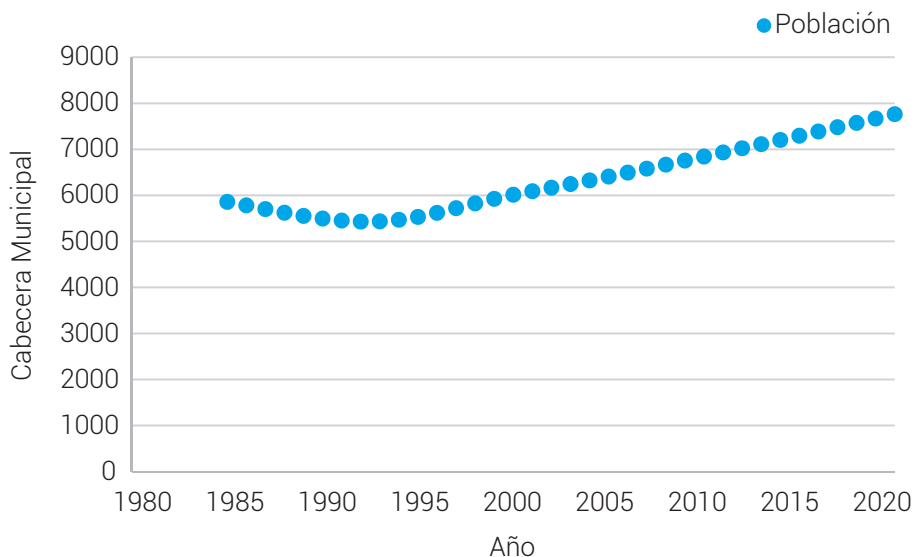


**Figura 1.** Evaluación de los factores de resiliencia comunitaria en Cáqueza. Se muestra el diagrama axial, la línea naranja evidencia el estado de los diferentes ítems en una evaluación de 1 a 5

**Fuente:** elaboración propia

Se plantea el modelo de logística humanitaria a partir de la identificación de las principales problemáticas y el análisis de la resiliencia, aplicado a las características del municipio. Este modelo, se basó en una combinación entre diferentes técnicas y herramientas usadas en la logística, la planeación y el control de operaciones, con el fin de generar un modelo compuesto por diferentes ecuaciones aplicadas a nivel industrial en la parte estratégica y operativa.

El análisis de la demanda, para el caso de Cáqueza fue determinado por el número de personas que habitan en el municipio, principalmente en su cabecera municipal, y la suavización de este dato mediante el índice de resiliencia que juega un papel fundamental en la selección de la población adaptable a un ambiente y entorno hostil. El DANE genera las cifras históricas y proyectadas del comportamiento del número de habitantes que se observa en la figura 2 y tabla 4.



**Figura 2.** Comportamiento poblacional del municipio de Cáqueza. Se evidencia en azul los datos históricos de población  
 Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.** Población histórica y proyectada

| Período         | Población | Período          | Población | Período          | Población | Período          | Población |
|-----------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| <b>1 - 1985</b> | 5860      | <b>10 - 1994</b> | 5471      | <b>19 - 2003</b> | 6247      | <b>28 - 2012</b> | 7024      |
| <b>2 - 1986</b> | 5784      | <b>11 - 1995</b> | 5533      | <b>20 - 2004</b> | 6326      | <b>29 - 2013</b> | 7114      |
| <b>3 - 1987</b> | 5703      | <b>12 - 1996</b> | 5622      | <b>21 - 2005</b> | 6410      | <b>30 - 2014</b> | 7205      |
| <b>4 - 1988</b> | 5625      | <b>13 - 1997</b> | 5723      | <b>22 - 2006</b> | 6496      | <b>31 - 2015</b> | 7297      |
| <b>5 - 1989</b> | 5555      | <b>14 - 1998</b> | 5827      | <b>23 - 2007</b> | 6582      | <b>32 - 2016</b> | 7389      |
| <b>6 - 1990</b> | 5498      | <b>15 - 1999</b> | 5926      | <b>24 - 2008</b> | 6669      | <b>33 - 2017</b> | 7482      |
| <b>7 - 1991</b> | 5454      | <b>16 - 2000</b> | 6015      | <b>25 - 2009</b> | 6757      | <b>34 - 2018</b> | 7576      |
| <b>8 - 1992</b> | 5431      | <b>17 - 2001</b> | 6091      | <b>26 - 2010</b> | 6845      | <b>35 - 2019</b> | 7671      |
| <b>9 - 1993</b> | 5436      | <b>18 - 2002</b> | 6168      | <b>27 - 2011</b> | 6934      | <b>36 - 2020</b> | 7766      |

Fuente: Rescatado y adaptado de DANE [30]

Enfatizando en que la demanda es un valor de entrada del modelo y para la obtención de resultados iniciales, se parametrizó este dato mediante una regresión y generación de ecuación de cálculo en Excel, tomando como indicador el índice de correlación  $R^2$ , en la selección de métodos de predicción.

Como resultado de este ejercicio, se determinó la ecuación (1) con mayor correlación entre los datos y representa la demanda  $P_n$  en cualquier periodo n, la cual se presenta a continuación.

$P_n =$  Demanda en un periodo  $n, n = 1, 2, 3, \dots, n$

$$P_n = 0.0064x^2 - 0.6027x^2 + 20.477x^2 - 209.13x + 6115.4 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9982$$

La ecuación (1) determina el número de personas presentes en la cabecera municipal, los cuales demandan una cierta cantidad de suministros que a su vez están restringidos por el índice de resiliencia poblacional lo cual origina la ecuación (2), adicional, se determinó mediante el estudio de campo que un KIT puede ser usado por un núcleo familiar compuesto de tres personas y esto se ve representado en la ecuación (3), por ende, la reposición y distribución de estos elementos se hace en razón a este dato.

$D =$  Demanda poblacional

$I_r =$  Índice resiliencia poblacional,  $0 \leq I_r \leq 1$

$C =$  Número de personas en el núcleo familiar (3 personas por familia)

$$D = P_n * I \quad (2)$$

$$D = \frac{P_n * I}{C} \quad (3)$$

Ahora bien, los inventarios en un ambiente logístico de tipo humanitario son el principal objeto de estudio según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, en donde se busca determinar el nivel de existencias adecuado para minimizar las roturas de *mercancía almacenada* y poder atender en todo momento a la demanda, en el aspecto más básico, con el objetivo de contar con un número de unidades disponibles para brindar una atención que mitigue el impacto que un evento no deseado tiene en una sociedad.

Debido a lo anterior, la teoría de manejo de inventarios para el objeto de estudio, tiene un enfoque diferente, pues el ambiente en donde se aplicarán los modelos es mucho más susceptible ante los errores y rigurosidad que se den en el desarrollo práctico de la planeación y control de los elementos a almacenar, pues el usuario final, será una persona que se encuentra en estado vulnerable y su salud, bienestar, cuidado y prevalencia dependerá estrictamente de que los productos se encuentren siempre a su disposición en las mejores y dignas condiciones.

En la tabla 5 se describen las características de los productos a transportar, almacenar y distribuir, lo que permite justificar el porqué se deben manejar los suministros bajo dos políticas de inventario diferentes.

**Tabla 5. Clasificación de kits bajo modelo de inventarios a manejar**

| <b>Modelo 1</b>  | <b>Modelo 2</b>               |
|--|-------------------------------|
| Kit 1: productos de mantenimiento básica (cobijas, almohadas, colchonetas) | Kit 3: productos alimenticios |
| Kit 2: productos de aseo personal  | Kit 4: medicamentos           |

**Fuente:** elaboración propia

El modelo 1 tiene como principal característica considerar productos que no son perecederos, de práctico almacenamiento, de necesidad básica, con una rigurosidad de almacenamiento media, es decir que el cuidado y adecuación del espacio no es estricto y sobre todo la frecuencia de reposición es baja.

Con base en estas características se propone un modelo de manejo de inventarios con restricciones, el cual, además de considerar las características de los productos ya mencionados, acepta los siguientes supuestos:

- Se aplica para n referencias de productos.
- No admite faltantes.
- No incluye descuentos en el precio de compra.
- Involucra limitaciones o restricciones de diversa índole.

Matemáticamente, el modelo 1 que se propone es el siguiente:

$C_i$ : Costo de adquisición de cada uno de los kits tipo  $i$

$D$ : Demanda poblacional

$K_i$ : Costo de colocación de los pedidos por cada kit tipo  $i$

$D_{jl}$ : Demanda del centro de distribución  $j$  del producto  $l$

$h_i$ : Costo de almacenamiento de cada kit tipo  $i$

$a_i$ : Área necesaria para almacenar cada kit de tipo  $i$

$A$ : Área total disponible de almacenaje

$\lambda$ : Gradiente de lagrange

$CTU$ : Costo total de almacenaje

$n$ : Número de artículos

$$\text{Min } z (CTU) = \sum_{i=1}^n C_i * D + \sum_{i=1}^n \frac{K_i * D}{D_{jl}} - \lambda \left( \sum_{i=1}^n a_i * D_{jl} - A \right) \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n a_i * D_{jl} \leq A \quad (5)$$

$$D_{jl} \geq 0 \quad (6)$$

$$D = \sum_i D_{jl} \quad (7)$$



Donde:

$$D_{jl} = \frac{\sqrt{2K_i * D}}{h_i * 2\lambda a_i} \quad (8)$$

$$\lambda_{cercano} \cong \frac{\bar{h}}{2 * \bar{a}} - \frac{n^2 * \bar{a} * \bar{K} * \bar{D}}{A^2} \quad (9)$$

Prueba de optimización

$$\sum_{i=1}^n a_i * D_{jl} - A \cong 0 \quad (10)$$

Ahora bien, los kits 3 y 4 que se contemplan en el modelo 2, son productos que tienen una alta rotación y que su manejo en teoría debe ser un único periodo, pues el ciclo de vida de estos está limitado y se pierde su utilidad pasado determinado tiempo.

Los alimentos y medicamentos son productos cuyo cuidado y rotación son de especial atención, pues no tener claras las políticas con que se deben pedir estos pueden significar, una gran cantidad en *depósito* de productos que no se consumen y una alta demanda de suministros que no se tienen.

Según Hamdy A. Taha [28] en estas situaciones, el problema debe ser abordado bajo la metodología conocida como "El caso del repartidor de periódicos" o modelo de inventarios de un solo periodo, el cual realiza consideraciones de tipo estocásticas, que permiten tener un valor aproximado de consumo según distribución de probabilidad normal, disminuyendo el grado de incertidumbre entre cada pedido de productos costosos y relevantes para la población.

Posterior al análisis de la demanda y del manejo de inventarios a utilizar en los centros de distribución, se procedió a establecer el modelo logístico de distribución en varias instalaciones, descrito en la tabla 6, cuyo objetivo principal era la determinación del ruteo óptimo de una serie de vehículos, que buscan enviar mercancía desde nodos que tienen disponibilidad de estas, a nodos que poseen una demanda de esos bienes. En este diseño, se pueden considerar los siguientes elementos principales:

1. Mapa logístico: nodos que representan los lugares de recogida, entrega o conexión, y enlaces principales caracterizados por tener una distancia específica entre sí. Se representan a partir de la georreferenciación de los almacenes, centros de distribución y albergues.
2. Mercancías: son el flujo de productos a través del modelo y que están agrupados en 4 kits dependiendo de su tipo: alimentos, medicamentos, frazadas y elementos de aseo personal, cada uno con un volumen (m<sup>3</sup>) específico.

3. Vehículos: se consideran de dos tipos, dependiendo de su nodo inicio (almacén o centro de distribución) caracterizados por tener determinada capacidad, costos variables y fijos, y disponibilidad.

**Tabla 6. Modelo logístico de distribución**

| <b>Parámetros</b>                                   |   |                 |
|---|---|-----------------|
| $D_{jl}$  | <i>Demanda del centro de distribución j del producto l</i>  | <i>Unidades</i> |
| $C_j$   | <i>Capacidad de almacenamiento del centro de distribución j</i>   | $m^3$           |
| $K_i$   | <i>Capacidad de almacenamiento de los vehículos en el almacén i</i>   | $m^3$           |
| $K_j$   | <i>Capacidad de almacenamiento de los vehículos en el centro de distribución j</i>                          | $m^3$           |
| $V_i$   | <i>Disponibilidad de vehículos en el almacén i</i>  | <i>Unidades</i> |
| $V_j$   | <i>Disponibilidad de vehículos en el centro de distribución j</i>   | <i>Unidades</i> |
| $Vol_l$   | <i>Volúmen del producto l</i>   | $m^3$           |
| $L_{ij}$  | <i>Distancia entre el almacén i y el centro de distribución j</i>   | <i>Km</i>       |
| $L_{jk}$  | <i>Distancia entre el centro de distribución j y el albergue k</i>  | <i>Km</i>       |
| $CA_j$  | <i>Costo de cargue y descargue en el centro de distribución j</i>   | $\$/m^3$        |
| $CB_j$  | <i>Costo de utilización del centro de distribución j</i>  | $\$$            |
| $CR_{ij}$   | <i>Costo de transporte del almacén i al centro de distribución j</i>  | $\$/Km$         |
| $CR_{jk}$   | <i>Costo de transporte del centro de distribución j al albergue k</i>                                       | $\$/Km$         |
| $CU_{ij}$   | <i>Costo de uso del vehículo del almacén i al centro de distribución j</i>                                  | $\$$            |
| $CU_{jk}$   | <i>Costo de uso del vehículo del centro de distribución j al albergue k</i>                                 | $\$$            |
| $P$   | <i>Población del municipio</i>  | <i>Unidades</i> |
| $N_l$   | <i>Número de kits de tipo l demandados por persona</i>  | <i>Unidades</i> |
| $I$   | <i>Índice de resiliencia de la población</i>  | $\%$            |
| <b>VARIABLES</b>                                    |   |                 |
| $X_{ijkl}$  | <i>Cantidad de productos tipo l enviados desde el almacén i al centro de distribución j y al albergue k</i> | <i>Unidades</i> |
| $P_{ij}$  | <i>Cantidad de vehículos usados del almacén i al centro de distribución j</i>                               | <i>Unidades</i> |
| $P_{jk}$  | <i>Cantidad de vehículos usados del centro de distribución j al albergue k</i>                              | <i>Unidades</i> |
| $W_j$   | <i>Utilización del centro de distribución j</i>   | <i>Bin</i>      |
| <b>COSTOS</b>                                       |   |                 |
| $Z$   | <i>Costo total del modelo</i>   | $\$$            |
| $CM$  | <i>Costo de manejo de los centros de distribución</i>   | $\$$            |
| $CA$  | <i>Costo de almacenamiento</i>  | $\$$            |
| $CT$  | <i>Costo de transporte</i>  | $\$$            |
| $CV$  | <i>Costo de utilización vehículos</i>   | $\$$            |
| <b>FUNCIÓN OBJETIVO: minimización de los costos</b> |   |                 |
| $Min (Z) = CM + CA + CT + CV \quad (12)$            |   |                 |
| $CM = \sum_j (CB_j * W_j) \quad (13)$               |   |                 |

$$CA = \sum_{jl} (CA_j * X_{ijkl} * Vol_l) \quad (14)$$

$$CT = \sum_{ij} [L_{ij} * (2CR_{ij} * P_{ij})] + \sum_{jk} [L_{jk} * (2CR_{jk} * P_{jk})] \quad (15)$$

$$CU = \sum_{ij} (CU_{ij} * P_{ij}) + \sum_{jk} (CU_{jk} * P_{jk}) \quad (16)$$

---

### RESTRICCIONES

---

*A. Capacidad de almacenamiento de los centros de distribución j*

$$\sum_{jl} (Vol_l * X_{ijkl}) \leq \sum_j (W_j * C_j) \quad (17)$$

*B. Demanda de los CD j del producto l*

$$\sum_i X_{ijkl} = D_{jl} \quad (18)$$

*D<sub>jl</sub> = Tomada del modelo de inventarios*

*C. Capacidad de los vehículos en el almacén i*

$$\sum_l (Vol_l * X_{ijkl}) \leq \sum_i (K_i * P_{ij}) \quad (19)$$

*D. Capacidad de los vehículos en el centro de distribución j*

$$\sum_l (Vol_l * X_{ijkl}) \leq \sum_j (K_j * P_{jk}) \quad (20)$$

*E. Uso racional de los vehículos en el almacén i*

$$\sum_i [K_i (P_{ij} - 1)] \leq \sum_l (Vol_l * X_{ijkl}) \quad (21)$$

*F. Uso racional de los vehículos centro de distribución j*

$$\sum_j [K_j (P_{jk} - 1)] \leq \sum_l (Vol_l * X_{ijkl}) \quad (22)$$

*G. Disponibilidad de vehículos en el almacén i*

$$\sum_i P_{ij} \leq V_i \quad (23)$$

*H. Disponibilidad de vehículos en el centro de distribución j*

$$\sum_j P_{jk} \leq V_j \quad (24)$$


---

**Fuente:** elaboración propia

Aunque los esfuerzos de ayuda durante una situación de emergencia generalmente se extienden a diferentes periodos, el modelo está diseñado para la etapa inicial, y a nivel operativo, cuando la organización a cargo de la distribución, en este caso los entes gubernamentales, tiene una cantidad determinada de productos a distribuir. El modelo determina (1) el número de vehículos de cada tipo que se utilizarán para la distribución de la ayuda, (2) la cantidad de suministros entregados a cada nodo

(conexión o final) durante la operación y los recursos utilizados en la ejecución de la distribución.

La validación es un proceso sumamente importante en toda investigación pues el trabajo y tiempo dedicado en cualquier proyecto debe encontrarse estrechamente relacionado con el mundo real de aplicación de su sector, esto indica que, tras haber aplicado distintas herramientas, teorías, modelos matemáticos, estos deben ser aplicables, repetibles y de utilidad en el objeto de estudio.

Para lograr este cometido, la opinión, dirección y acompañamiento de expertos fue fundamental para realizar los debidos ajustes, modificación y cambios necesarios para poder entregar un modelo logístico que se adaptara a las características del municipio y al índice de resiliencia poblacional. La validación se trabajó bajo tres enfoques:

- Ubicación y sugerencia de centros de distribución, uso de vías y centro de acopio.
- Aplicabilidad y coherencia del modelo de demanda, inventarios y distribución y transporte.
- Capacidad y personal requerido para la atención del centro de acopio.

En la selección de puntos geográficos, los centros de atención de la Cruz Roja, dos de estos situados en la ciudad de Bogotá, y uno en la ciudad de Villavicencio, y el centro de acopio conocido como central de emergencias, fueron seleccionados sin discusión alguna, pues, a conveniencia de la investigación se definió que los suministros tanto nacionales como la ayuda humanitaria a nivel internacional iban a ser recolectados por esta entidad y a partir de allí toda la operación logística se llevaría a cabo. La tabla 7, resume los puntos mencionados y sus coordenadas en latitud y longitud.

**Tabla 7. Ubicación de almacenes (i)**

| <b>Ubicación</b>            | <b>Latitud</b> | <b>Longitud</b> |
|-----------------------------|----------------|-----------------|
| Cruz Roja 1 – Bogotá        | 4,6729468      | -74,0894352     |
| Cruz Roja 2 – Bogotá        | 4,6214887      | -74,1061349     |
| Cruz Roja 3 – Villavicencio | 4,1493777      | -73,6359984     |

**Fuente:** elaboración propia

Ahora bien, dentro del diseño logístico los tres puntos anteriormente mencionados serán los encargados de abastecer tres centros de distribución en Cáqueza distintos a los que actualmente se consideran aptos, sin embargo, se ha identificado

a lo largo de la investigación que zonas como el Coliseo y el colegio Rafael Núñez son aptos para formar parte del modelo logístico por sus características geográficas.

Para la selección de estos puntos, inicialmente se recurrió a la opinión de los organismos de atención y manejo de desastres, como patrulleros de la Policía Nacional y bomberos, el resultado de este ejercicio fue la identificación de puntos viables para la selección de un albergue y los centros de distribución, la tabla 7 resume la sugerencia entregada por parte de estos. Y a través de la figura 3, se puede visualizar e identificar la locación de los puntos resumidos en la tabla 8.

**Tabla 8.** Posibles ubicaciones para la selección de centros de distribución (j) en Cáqueza

| Ubicación                      | Latitud  | Longitud   |
|--------------------------------|----------|------------|
| Coliseo municipal              | 4,404538 | -73,948590 |
| Colegio Santiago Gutiérrez     | 4,406940 | -73,948809 |
| Piscina municipal              | 4,407659 | -73,950518 |
| Centro vacacional Summer Sun   | 4,417036 | -73,969496 |
| Plaza municipal                | 4,403901 | -73,941773 |
| Estadio / Estación de Bomberos | 4,397271 | -73,944743 |

Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** Ubicación geográfica de puntos potenciales para la selección de centros de distribución en Cáqueza. Se evidencian los puntos a evaluar ubicados en Cáqueza en color rojo

Fuente: elaboración propia

La solución del modelo logístico con resiliencia contempla únicamente tres centros de distribución, para su selección se aplicó un modelo de evaluación de factores en donde la periferia y distancia al centro del municipio juegan un papel fundamental, dado que aquellos lugares que se encuentran en el centro están propensos a quedar sin rutas de acceso debido a sus características geográficas.

Los factores seleccionados para la evaluación son los siguientes:

1. Cercanía a vías principales de acceso
2. Ubicación en aire libre y espacio amplio
3. Distancia conveniente en áreas de influencia – albergues
4. Mayor distancia al centro del municipio – periferia
5. Espacios libres y de menor riesgo de afectación
6. Facilidad de entrada vehicular y movilidad posevento
7. Oportunidad potencial de respuesta y buen nivel de servicio a las áreas de influencia
8. Cercanía a recursos hídricos naturales
9. Espacio idóneo para la construcción de albergues
10. Facilidad de instalación de puestos de control

Posteriormente, se llevó a cabo la evaluación de estos factores, la metodología empleada consistió en tomar como base la figura 1 y evaluar cada ubicación geográfica en una escala de 1 a 5 según su relación con los elementos de juicio. La tabla 9 representa los resultados obtenidos tras este ejercicio.

**Tabla 9. Evaluación de factores influyentes para la toma de decisiones**

| <b>Zona/Factor</b>             | <b>F 1</b> | <b>F 2</b> | <b>F 3</b> | <b>F 4</b> | <b>F 5</b> | <b>F 6</b> | <b>F 7</b> | <b>F 8</b> | <b>F 9</b> | <b>F 10</b> | <b>TOTAL</b> |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|--------------|
| Coliseo municipal              | 2          | 3          | 1          | 1          | 2          | 1          | 2          | 1          | 4          | 5           | 22           |
| Colegio Santiago Gutiérrez     | 2          | 2          | 1          | 1          | 2          | 1          | 2          | 1          | 2          | 5           | 19           |
| Piscina municipal              | 5          | 5          | 5          | 5          | 3          | 5          | 5          | 5          | 4          | 5           | 47           |
| Centro vacacional Summer Sun   | 5          | 5          | 4          | 5          | 3          | 5          | 5          | 3          | 3          | 5           | 43           |
| Plaza municipal                | 5          | 5          | 4          | 5          | 3          | 3          | 5          | 1          | 4          | 5           | 40           |
| Estadio / Estación de Bomberos | 2          | 1          | 1          | 1          | 2          | 1          | 3          | 1          | 2          | 5           | 19           |

**Fuente:** elaboración propia

Con base en los resultados, la piscina municipal, el centro vacacional Summer Sun y la plaza municipal son los candidatos potenciales que pueden brindarle una

mejor respuesta, la figura 4 representa de forma visual la relación de los centros de distribución evaluados y seleccionados respecto al albergue principal.



**Figura 4.** Relación de centros de distribución con el centro de acopio. Se presentan los puntos seleccionados después del análisis en rojo y en amarillo el centro de acopio seleccionado previo al estudio

Fuente: elaboración propia



Este primer punto de validación (selección de nodos y arcos del proceso logístico en el cual se operará la ayuda humanitaria) finalizó con la socialización de este entregable ante el municipio, en donde, los organismos encargados de la gestión del riesgo avalaron y aprobaron las localizaciones sugeridas para centros de distribución.

Adicionalmente, se desarrolló un aplicativo en Microsoft Excel, con el fin de plasmar dinámica y didácticamente los modelos matemáticos desarrollados en la investigación. Esta herramienta se trabajó, corrigió y se ajustó a las necesidades del municipio en materia de practicidad, entendimiento, manipulación e interpretación de datos por parte de los organismos encargados de la gestión del riesgo.

El aplicativo cobra sentido dado que las condiciones de trabajo pueden variar respecto al tiempo, en cuestión de distancias, costos, espacios disponibles, puntos al interior de la cadena logística, entre otros, así que con la parametrización de los modelos trabajados se busca una respuesta óptima aun cuando las características de Cáqueza cambien contribuyendo en la toma de decisiones.

Mediante herramientas contenidas en Microsoft Excel se diseñaron diferentes módulos de ingreso de datos, cálculos y resultados, estos se presentan en la tabla 10, la cual contiene una descripción detallada de los módulos presentes en el aplicativo.

Tabla 10. Descripción de módulos en el aplicativo

| ÍCONO  | DESCRIPCIÓN  |
|--|--|
| <p>Data Dashboard</p>                                       | <p>Esta pestaña permite al usuario ingresar todos los parámetros y datos de entrada que posee el modelo, el encargado de manipular el aplicativo tendrá la libertad de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Configurar los costos de cada uno de los kits.</li> <li>• Determinar las dimensiones de las cajas en las que se empacan los kits.</li> <li>• Variar y configurar los diferentes volúmenes disponibles para los centros de distribución.</li> <li>• Variar y recalcular distancias entre los distintos puntos del modelo.</li> <li>• Cambiar tasas y costos de peajes.</li> <li>• Variar la capacidad de almacenamiento de los vehículos y el número de estos.</li> <li>• Modificar los costos logísticos de transporte y distribución.</li> <li>• Modelo de inventarios con restricciones de espacio</li> </ul> |
| <p>Modelo de inventarios con restricciones de espacio</p>   | <p>Este módulo da respuesta a la necesidad de determinar una utilización óptima de los centros de distribución en el almacenamiento de los KITS 1 y 2, para ello se realizó una macro la cual trabaja con un complemento de Excel, llamado Solver, dado que este es un modelo de optimización y requiere de un determinado número de interacciones hasta encontrar la mejor solución.</p>  |
| <p>Modelo de inventario de un solo período de tiempo</p>  | <p>Este módulo se estipuló para manejar productos perecederos o de alimentos y medicamentos o medicinas.</p> <p>Dado que su frecuencia de consumo y rotación es alta y su vida útil es relativamente corta, los modelos implementados están relacionados con distribuciones de probabilidad lo cual hace que el usuario no tenga interacción con este apartado diferente al rol de consulta de resultados.</p>   |
| <p>Modelo de transporte y distribución</p>                | <p>Este módulo requiere de la interacción del usuario, de los datos que previamente se han registrado en el Data Dashboard y de los resultados arrojados en los modelos anteriores, definen la demanda interna del modelo logístico para la reposición de mercancías basadas en demanda real.</p> <p>La pestaña permite reconocer las cantidades a transportar a cada uno de los nodos de trabajo, cuanto se distribuye en cada centro de distribución y la secuencia de la flota de camiones disponibles para la operación logística.</p>   |
| <p>Resumen</p>    | <p>Finalmente, cuando se hayan modificado los datos y ejecutado todos los modelos, la hoja resumen muestra los resultados arrojados por el aplicativo en cuestión de costos y cantidades. En este punto se requiere de una buena interpretación de datos pues al agrupar los resultados facilita la toma de decisiones para el analista.</p>   |

Fuente: elaboración propia



Para ilustrar al lector en el trabajo realizado en este apartado, se anexan algunas vistas del aplicativo realizado para materializar, solucionar y parametrizar los modelos matemáticos desarrollados y contenidos en los módulos anteriormente descritos.

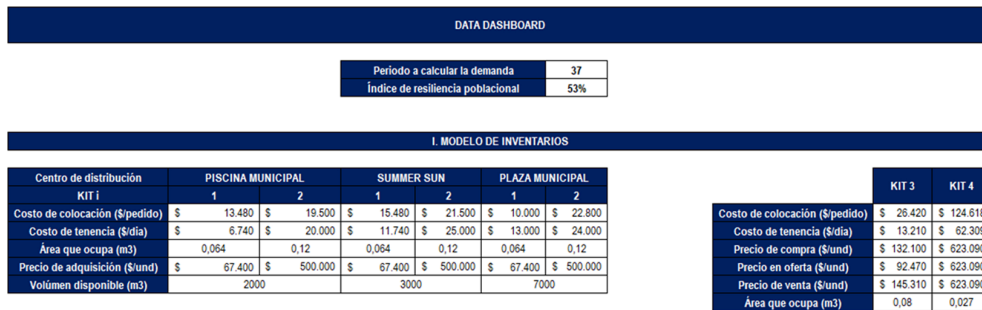
Dentro del diseño y constitución, la figura 5 evidencia el diseño de una portada de conexión y fácil navegación por los distintos módulos.



**Figura 5.** Portada del aplicativo. Se presentan los botones con hipervínculos presentes en la portada del aplicativo

Fuente: elaboración propia

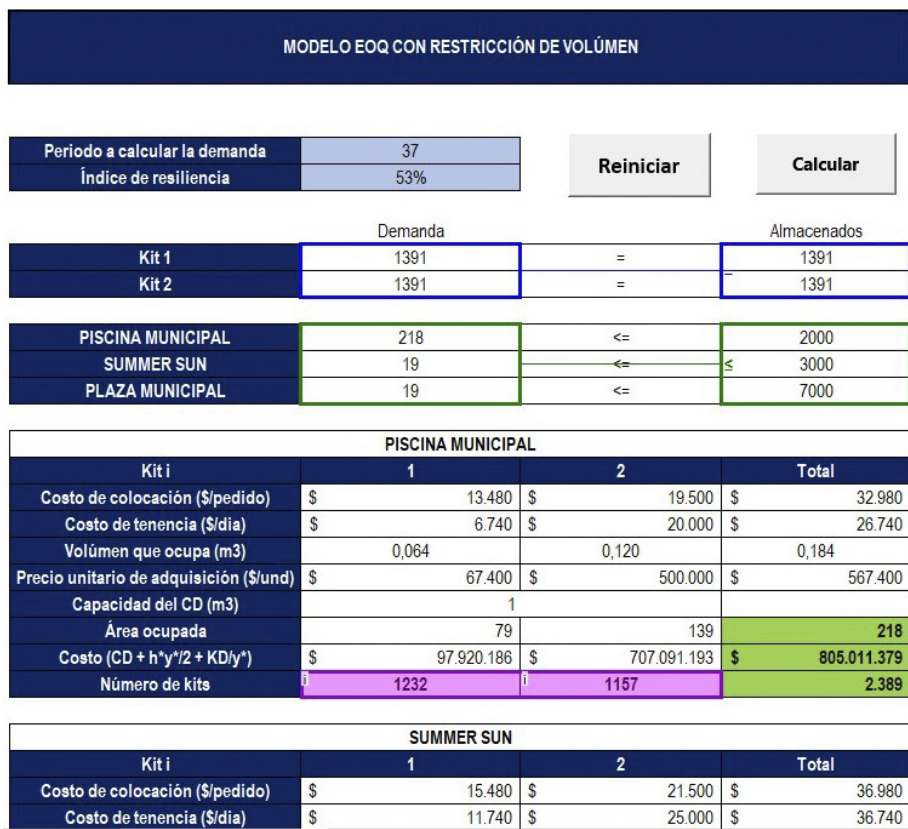
Ahora bien, como parte del proceso de parametrización la figura 6 representa el módulo llamado Data Dashboard cuya principal función se ve reflejada en el ingreso de datos que alimentan el modelo, son modificables y variables respecto al tiempo.



**Figura 6.** Visualización de la hoja Data Dashboard. Se presenta el formato diseñado para el ingreso manual de los datos

Fuente: elaboración propia

Finalmente en el registro de visualizaciones del aplicativo realizado, la figura 7 es la representación de uno de los modelos trabajados por los investigadores, el cual calcula, define y sugiere una cantidad óptima aprovechando el espacio disponible en bodega mediante el uso de macros y una extensión de Microfost Excel conocida como Open Solver.



**Figura 7.** Visualización del modelo de inventarios con restricciones. Se presenta la estructura diseñada para el manejo de macros que calculan el inventario óptimo  
 Fuente: elaboración propia

En el proceso de validación, el último trabajo realizado se enfocó en la forma de operación en la repartición de kits y atención a los usuarios en el centro de acopio, dado que el estado anímico de la gente es complejo de controlar y manejar, se buscaba una forma de garantizar que el nivel de atención prestado fuera óptimo y respondiera a las necesidades de los afectados.

Para ello se realizó una simulación discreta en un *programa* conocido como Promodel con el único objetivo de visualizar el ambiente de entrega de los kits, conocer el estado de la cola que se generaría y el nivel de atención a la población.

Los criterios de evaluación iniciales consistían en brindar un 100% de nivel servicio, pero para ello se requería determinar el número de servidores que garantizaran que esto se cumpliera con los siguientes parámetros de entrada en la simulación:

- Dos tipos de entradas: personas damnificadas y personas con alguna discapacidad.

- Frecuencia de entradas en el centro de acopio para la repartición de los kits: Contante durante todo el periodo de simulación.
- Número de réplicas: tres, cada una de 4 horas para un total de 24 horas simuladas.
- Tiempo de espera promedio en la fila: 5 minutos
- Puestos de atención: tres.

Para poder identificar el número de puestos y personas atendiendo a la población, se realizó dentro de la simulación una prueba de ensayo y error, considerando un rango de población de 3000 a 4000 atendidas (resultado de la aplicación del índice de resiliencia) en 3 horas promedio de simulación, y se determinó que los puntos de atención 1 y 2 están en capacidad de atender a 50 personas, y el puesto 3, a 30 personas. Se debe aclarar que la selección de tres puntos de atención fue el resultado de varios ensayos y su respectiva interpretación de datos, con el fin de que en el sistema o en la fila se quede el menor número de personas esperando el servicio, al lograr este último objetivo se garantiza un nivel de atención aceptable y válido para la atención de un grupo de damnificados cuyas necesidades deben ser suplidas inmediatamente, con el fin de corroborar lo descrito anteriormente se presenta la tabla 11, en donde se resumen los resultados obtenidos.

**Tabla 11.** Mejora sugerida para la operación de los puntos de atención

| LOCATION NAME     | SCHEDULED HOURS | CAPACITY | TOTAL ENTRIES | AVERAGE MINUTES PER ENTRY | AVERAGE CONTENTS | MAXIMUM CONTENTS | CURRENT CONTENTS | %UTIL |             |
|-------------------|-----------------|----------|---------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------------|
| Entrada principal | 3               | 999.999  | 3.900         | 6,05                      | 131,18           | 290              | 290              | 0,01  | (AVERAGE)   |
| Entrada principal | -               | -        | -             | -                         | -                | -                | -                | -     | (STD. DEV.) |
| Salida principal  | 3               | 999.999  | 3.490         | -                         | -                | 1                | -                | -     | (AVERAGE)   |
| Salida principal  | -               | -        | -             | -                         | -                | -                | -                | -     | (STD. DEV.) |
| PUESTO 1          | 3               | 50       | 1.650         | 4,93                      | 45,22            | 50               | 50               | 90,45 | (AVERAGE)   |
| PUESTO 1          | -               | -        | -             | -                         | -                | -                | -                | -     | (STD. DEV.) |
| PUESTO 2          | 3               | 50       | 1.660         | 4,94                      | 45,61            | 50               | 50               | 91,24 | (AVERAGE)   |
| PUESTO 2          | -               | -        | -             | -                         | -                | -                | -                | -     | (STD. DEV.) |
| PUESTO 3          | 3               | 30       | 295           | 9,78                      | 16,03            | 20               | 15               | 53,45 | (AVERAGE)   |
| PUESTO 3          | -               | -        | -             | -                         | -                | -                | -                | -     | (STD. DEV.) |

**Fuente:** elaboración propia

Tras haber realizado la validación en tres enfoques distintos, se identifica que el nivel de atención brindada a una población con necesidades patentes deben ser atendidas de una forma organizada y eficiente, considerando las características del objeto de estudio que transforman el ambiente de trabajo prescriptivo a uno descriptivo haciendo que las soluciones propuestas basadas en modelos dinámicos y sistémicos que se ajusten más a la realidad.

Posterior a la simulación, se procede a realizar la evaluación del proyecto, que gracias a sus características y al aporte multidimensional de la investigación, permite seguir una metodología basada en el análisis de la contribución social. Para realizar este proceso, se buscó el estudio de cuatro criterios: social, técnico, económico e institucional, a partir de los cuales surgieron diez variables de evaluación ponderadas y calificadas por miembros de la Alcaldía de Cáqueza, como se evidencia en la tabla 12.

**Tabla 12.** Ponderación y evaluación multicriterio del proyecto

| <b>Criterio de Evaluación</b> | <b>Variable de Evaluación</b>              | <b>Ponderación</b> | <b>Calificación</b> | <b>Evaluación total</b> |
|-------------------------------|--|--------------------|---------------------|-------------------------|
| Criterio social (40)          | 1. Relevancia                              | 15%                | 5                   | 0.75                    |
|                               | 2. Reducción de vulnerabilidad y cobertura | 20%                | 4                   | 0.8                     |
|                               | 3. Impacto                                 | 10%                | 4                   | 0.4                     |
| Criterio técnico (30)         | 4. Pertinencia                             | 5%                 | 5                   | 0.25                    |
|                               | 5. Coherencia externa                      | 10%                | 4                   | 0.4                     |
|                               | 6. Coherencia interna                      | 10%                | 5                   | 0.5                     |
| Criterio económico (18)       | 7. Costos totales                          | 10%                | 5                   | 0.5                     |
|                               | 8. Eficiencia                              | 5%                 | 5                   | 0.25                    |
| Criterio institucional (12)   | 9. Capacidad                               | 5%                 | 5                   | 0.25                    |
|                               | 10. Participación                          | 10%                | 4                   | 0.4                     |
|                               |  |                    |                     | <b>4.5</b>              |

**Fuente:** elaboración propia

Finalmente, con base en la escala utilizada, de 1 a 5, el proyecto se ubica en el rango más alto de la evaluación que evidencia que los resultados entregados al municipio no son únicamente sinónimo de rendimiento, eficiencia, y viabilidad, sino que permite articular la ingeniería a la solución de problemas de impacto en poblaciones de alto riesgo, a partir de herramientas logísticas previamente planificadas que permitan ofrecer a la comunidad un escenario que reduzca sustancialmente la incertidumbre.

## 6. Discusiones

Como parte final del proceso se realizó una sustentación de la investigación realizada para los organismos encargados de la gestión del riesgo del municipio. Se recolectaron diferentes opiniones y un conjunto de reflexiones internas desarrolladas por los miembros del equipo investigador, que permitieron identificar las implicaciones, limitaciones y problemas que se presentaron a lo largo del tiempo dedicado al desarrollo de un modelo matemático de logística humanitaria con resiliencia y sobre todo abrir un espacio para futuras investigaciones, modelos más robustos y las consideraciones de múltiples factores incidentes en este tipo trabajos.

Uno de los estudios que es referente para la investigación fue el de Kovacs y Spens [3], quienes afirman que el éxito del proceso logístico humanitario se ve representado en tres fases fundamentales, la preparación, la respuesta inmediata y la reconstrucción. El estudio se centra específicamente en la segunda fase, donde la gestión de la demanda, la administración de provisiones y la gestión del cumplimiento son prioridad del proceso como lo recomiendan los autores.

Por otro lado, se puede comparar la investigación con los estudios realizados por Morteza Ahmadi y Abbas Seifi [29], quienes diseñan y proponen un modelo logístico caracterizado y compuesto por ecuaciones de tipo probabilístico, las cuales evalúan distintas probabilidades de cierre de vías y de incumplimiento de la demanda, lo que es coherente con la realidad, ya que es más eficiente que considerar modelos lineales.

En contraste a lo dicho anteriormente, en la investigación presentada en este artículo, los modelos considerados, desarrollados y propuestos son lineales dado que Cáqueza ha sido afectado por varias catástrofes naturales, pero, en su historia reciente no cuenta con eventos naturales de gran afectación para el municipio, es decir, no existen datos históricos que permitan hacer un análisis probabilístico adecuado y coherente con el nivel del riesgo, amenaza y vulnerabilidad actual que se presenta en esta zona geográfica.

Esta es la razón principal por la que cada uno de los modelos presentados en el proyecto (distribución e inventarios), son trabajados a partir de la metodología de programación lineal, atendiendo a las características de temporalidad, capacidad, demanda y disponibilidad de recursos, de la situación actual de Cáqueza y desde el punto de vista de los autores.

Sin embargo, este punto es el que origina una oportunidad de mejora y la apertura a nuevas investigaciones, pues en un escenario posdesastre y de respuesta inmediata existe una mayor probabilidad de éxito si se diseñan e implementan modelos bajo las características del referente Morteza Ahmadi y Abbas Seifi, pues el grado de

complejidad es mayor y su aplicabilidad es mucho más amplia y no específica como lo fue el caso Cáqueza.

## 7. Conclusiones

El aspecto más relevante e innovador de la investigación es la aplicación de la resiliencia al escenario de la gestión del riesgo y su adecuación matemática, por medio del índice de resiliencia a los modelos matemáticos de logística humanitaria. Esto proporciona un acercamiento a la realidad mucho más acertado, así lo demuestran los resultados obtenidos de la investigación, pues al considerar necesidades poblacionales y determinar un perfil estratégico de respuesta ante emergencias, mediante la aplicación de herramientas diagnósticas presentadas a lo largo del documento, se tiene claro cuáles son los puntos a considerar en el diseño y ejecución de un plan de acción posdesastre, el cual se ve plasmado y se puede identificar directamente con el aplicativo en Microsoft Excel que los investigadores diseñaron, junto con la validación realizada mediante la opinión de expertos y la construcción de una simulación que plasmara el proceso de distribución en el centro de acopio, el cual también fue seleccionado mediante herramientas propias de la ingeniería. Todo esto llevó a una simplificación de la toma de decisiones en un escenario en donde este ejercicio se torna complejo, debido al número de variables a manejar, y originó una contribución por parte del grupo de investigación a un segmento de personas, las cuales reconocen públicamente y abiertamente que lo desarrollado es de gran ayuda para la gestión del riesgo municipal.

Por este motivo, es el momento de abrir camino a nuevas investigaciones que fusionen los elementos resilientes con aplicaciones matemáticas más reales y eficientes, que reduzcan la vulnerabilidad y el margen de error en los cálculos y predicciones, para que de esta manera, se evalúe integralmente la situación de los habitantes con alto grado de riesgo ante desastres, quienes serán los verdaderos beneficiados al estar cubiertos por medio de políticas y planes bien establecidos y fundamentados a través de la ingeniería.

## Referencias

- [1] Organización Panamericana de Salud. (1990). *Protección de la salud mental en situaciones de desastres y emergencias*. [PDF en línea]. Disponible en [http://counselingamericas.org/pdf/libros/03\\_LibroProtecciondeLaSaludMental.pdf](http://counselingamericas.org/pdf/libros/03_LibroProtecciondeLaSaludMental.pdf)

- [2] Q. Lu, M. Goh y R. De Souza, "Learning mechanisms for humanitarian logistics", *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, vol. 3 no. 2, pp.149-160, 2013, doi: <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-10-2012-001>
- [3] G. Kovács y K. Spens, "Identifying challenges in humanitarian logistics", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 39, no. 6, pp. 506-528, 2009, doi: <https://doi.org/10.1108/09600030910985848>
- [4] A. Haghani y S.C Oh, "Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 30, no. 3, pp. 235-237, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(95\)00020-8](https://doi.org/10.1016/0965-8564(95)00020-8)
- [5] G. H. Tzeng, "Multiobjective optimal planning for designing relief delivery systems", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 43, no. 6, pp. 673-686, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.10.012>
- [6] J. T. Rodríguez, B. Vitoriano, J. Montero y A. Omaña, "A natural disaster management DSS for humanitarian non-governmental organisations. Knowledge-Based Systems", *Knowledge-Based Systems*, vol. 23, Issue 1, pp. 17-22, 2010, febr, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2009.07.009>
- [7] S. Luthar y D. Cicchetti, "The construct of resilience: Implications for interventions and social policies", *Development and Psychopathology*, vol. 12, no. 4, pp. 857-885, 2000, doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0954579400004156>
- [8] J. Uriarte. "La perspectiva comunitaria de la resiliencia", *Psicología Política*, no. 47. pp. 7-18, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/garzon/psicologia%20politica/N47-1.pdf>
- [9] J. Twigg. *Características de una comunidad resiliente ante los desastres. Nota guía*, pp. 8-9. 2007 [En línea]. Disponible en: [http://www.eird.org/wikies/images/Spanish\\_Characteristics\\_disaster\\_high\\_res.pdf](http://www.eird.org/wikies/images/Spanish_Characteristics_disaster_high_res.pdf)
- [10] F. Salazar, J. Cavazos y G. Vargas, "Logística Humanitaria: Un enfoque del Suministro desde las Cadenas Agroalimentarias". *Inf. tecnol*, vol. 25, no.4, pp.43-50, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000400007>
- [11] A. Sheppard, P. Tatham, R. Fisher y R. Gapp, "Humanitarian logistics: enhancing the engagement of local populations", *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, vol. 3 Issue: 1, pp. 22-36, 2013, doi: <https://doi.org/10.1108/20426741311328493>

- [12] M. Safeer, S.P. Anbuudayasankar, K. Balkumar y K. Ganesh, "Analyzing transportation and distribution in emergency humanitarian logistics", *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 2248-2258, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.469>
- [13] D. Ospina, "La medición de la resiliencia", *Invest. Educ. Enferm*, vol.25 no.1. pp. 58-65. 2007, doi: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-53072007000100006](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-53072007000100006)
- [14] J. Ruiz, "Resiliencia comunitaria: propuesta de una escala y su relación con indicadores de violencia criminal", *Pensamiento Psicológico*, vol. 13 no. 1, pp. 119-135, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=80140030009>
- [15] O. Cohen, D. Leykin, M. Lahad, A. Goldberg y L. Aharonson-Daniel. "The conjoint community resiliency assessment measure as a baseline for profiling and predicting community resilience for emergencies", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 80, no. 9, pp. 1732-1741, 2013, doi:10.1016/j.techfore.2012.12.009
- [16] J. Joerin, R. Shaw, Y. Takeuchi y R. Krishnamurty, "Assessing community resilience to climate-related disasters in Chennai, India", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol 1, no. 1, pp. 44-54, 2012. doi:10.1016/j.ijdr.2012.05.006
- [17] G. Skerrat, "Community resilience, policy corridors and the policy challenge", *Land Use Policy*, vol. 31, pp. 298-310, 2013. doi:10.1016/j.landusepol.2012.07.011.
- [18] G. Wilson, "Community resilience, globalization, and transitional pathways of decision-making", *Geoforum*, vol. 43, no. 6, pp. 1218-1231, 2012. doi:10.1016/j.geoforum.2012.03.008.
- [19] H. Lange, K. Kramer y J. Faber, "Two approaches using traits to assess ecological resilience: a case study on earthworm communities", *Basic and Applied Ecology*, vol. 14, no. 1, pp. 64-73, 2013 doi:10.1016/j.baae.2012.10.009
- [20] E. Suárez-Ojeda, "Una concepción latinoamericana: la resiliencia comunitaria". En *Resiliencia: descubriendo las propias fortalezas*; 2001, A. Melillo, E. N. Suárez-Ojeda (Coord.), pp. 67-82, Buenos Aires: Paidós, [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2979469>
- [21] Páez, D, "Trauma, resiliencia y crecimiento post-traumático (personal y colectivo)". Trabajo presentado en el Seminario sobre Impacto Psicosocial de Eventos Colectivos, 2014, pp. 15-50, [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Dario\\_Paez/publication/285580393\\_Trauma\\_Social\\_Afrontamiento\\_Comunitario\\_y\\_Crecimiento\\_Postrumatico\\_Colectivo/links/565f8f1408ae1ef92985603b/Trauma-Social-Afrontamiento-Comunitario-y-Crecimiento-Postrumatico-Colectivo.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Dario_Paez/publication/285580393_Trauma_Social_Afrontamiento_Comunitario_y_Crecimiento_Postrumatico_Colectivo/links/565f8f1408ae1ef92985603b/Trauma-Social-Afrontamiento-Comunitario-y-Crecimiento-Postrumatico-Colectivo.pdf)



- [22] R. Campo, L. Granados, L. Muñoz, M. Rodríguez y S. García, "Caracterización del avance teórico, investigativo y/o de intervención en resiliencia desde el ámbito de las universidades en Colombia", *Universitas Psychologica*, vol. 11, no. 2, pp. 545-557, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rups/v11n2/v11n2a16.pdf>
- [23] Alcaldía municipal de Cáqueza. [En línea]. Disponible en: <http://www.caqueza-cundinamarca.gov.co/tema/municipio>.
- [24] Servicio Geológico Colombiano. [En línea]. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/bus/Paginas/results.aspx?k=caqueza>
- [25] N. Pahl y A. Richter, (2007), *Swot Analysis. Idea, Methodology and a practical approach Norderstet - Alemania*, pp. 7. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=JJEbWvG73YC&printsec=frontcover&dq=swot+analysis.+idea+methodology+and+a+practical+approach&hl=es&sa=X&ved=0ahUKewiKmrqLouTdAhVlw1kKHcrnAeo-Q6AEIKjAA#v=onepage&q=swot%20analysis.%20idea%20methodology%20and%20a%20practical%20approach&f=false>
- [26] B. Franklin, (2007), Auditoría Administrativa. p. 75. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=Cg7So8EZjllC&printsec=frontcover&dq=auditoria+administrativa+franklin&hl=es&sa=X&ved=0ahUKewjvtpTlo-TdAhFj1kKHauuBV4Q6AEILDAB#v=onepage&q=auditoria%20administrativa%20franklin&f=false>
- [27] Ó. Bejarano y D. Rojas. *Priorización de impactos de la quebrada La Salitrosa ubicada en la localidad de Suba*, Repositorio Universidad Distrital, 2016, p. 88.
- [28] H. A. Taha, *Modelos probabilísticos de inventario. En Investigación de operaciones*, 2004, pp. 567-577. México: Pearson Educación.
- [29] A. Morteza, S. Abbas, "A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 75, pp. 145-163, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.01.008>.
- [30] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2007). [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion>