

**CARACTERIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA MUNICIPAL DE CALI PARA
LA ATENCIÓN DE UN TERREMOTO**

**SANTIAGO BUESAQUILLO MERA
MARÍA FERNANDA GAVIRIA CORDÓN**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CALI
MAYO 2020**

**CARACTERIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA MUNICIPAL DE CALI PARA
LA ATENCIÓN DE UN TERREMOTO**

**SANTIAGO BUESAQUILLO MERA
MARÍA FERNANDA GAVIRIA CORDÓN**

Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial

**Director proyecto
ROLANDO JOSÉ ACOSTA AMADO, PH. D.**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CALI
MAYO 2020**

Contenido

	pág.
RESUMEN	9
Introducción	10
1 Contexto, Formulación y Justificación del Problema	11
1.1 Contexto	11
1.2 Situación objeto de estudio.....	13
1.3 Justificación de la situación objeto de estudio	13
2 Objetivos	14
2.1 Objetivo del Proyecto.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
2.3 Entregables.....	14
3 Marco de Referencia	15
3.1 Antecedentes o Estudios Previos	15
3.2 Marco Teórico.....	20
3.3 Contribución Intelectual o Impacto del Proyecto.....	23
4 Metodología	25
4.1 Objetivo 1: Clasificar la infraestructura municipal disponible en Cali para la atención de desastres causados por terremotos.	25
4.2 Objetivo 2: Definir la capacidad de la infraestructura municipal disponible en Cali.	26
4.3 Objetivo 3: Proponer la forma en que se debe utilizar la infraestructura municipal disponible en Cali.	28
4.3.1 Modelo de Programación Lineal Entera	28
4.3.2 Cálculo de Parámetros del Modelo	30
4.3.3 Solución del modelo	34
5 Resultados	35
5.1 Objetivo 1: Clasificar la infraestructura municipal disponible en Cali para la atención de desastres causados por terremotos.	35
5.1.1 Resultados	35
5.1.2 Discusión.....	38
5.1.3 Conclusiones.....	39
5.2 Objetivo 2: Definir la capacidad de la infraestructura municipal disponible en Cali.	40

5.2.1	Resultados	40
5.2.2	Discusión.....	45
5.2.3	Conclusiones.....	46
5.3	<i>Objetivo 3: Proponer la forma en que se debe utilizar la infraestructura municipal disponible en Cali.</i>	<i>47</i>
5.3.1	Resultados	47
5.3.2	Discusión.....	53
5.3.3	Conclusiones.....	54
6	Conclusiones y Recomendaciones	55
6.1	<i>Conclusiones Generales.....</i>	<i>55</i>
6.2	<i>Limitaciones y Recomendaciones</i>	<i>56</i>
	BIBLIOGRAFÍA	57
	ANEXOS.....	61

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Catalogo global de terremotos con daños potenciales y daños documentados	11
Figura 2: Análisis Causa-Efecto de la atención de desastres en Cali	13
Figura 3: Ajuste las dimensiones de un kit de ayuda humanitaria.	27
Figura 4: Gráfico de homocedasticidad	32
Figura 5: Gráfico de probabilidad normal de los residuos.	33
Figura 6: Tipo de recursos de infraestructura preliminar del municipio de Cali.	36
Figura 7: Tipo de recursos de infraestructura real del municipio de Cali.	36
Figura 8: Cantidad de tipo de recursos por comuna	37
Figura 9: Clasificación de los recursos de infraestructura del municipio de Cali.	38
Figura 10: Capacidad para almacenamiento de kits de ayuda humanitaria por comuna	41
Figura 11: Capacidad para albergar personas por comuna	42
Figura 12: Capacidad en cantidad de camas para heridos por comuna.	42
Figura 13: Mapa de la infraestructura de Cali para ser usada como Albergues o Bodegas.....	43
Figura 14 Mapa de la infraestructura de Cali para ser usada para la atención en salud	44
Figura 15: Mapa con toda la infraestructura identificada para la atención de un terremoto	45
Figura 16: Grafico de dispersión de los resultados del escenario 1 sin la restricción de equidad	50
Figura 17: Grafico de dispersión de los resultados del escenario 1 para la atención en salud	50
Figura 18: Resumen de los resultados del modelo por propósito en cada escenario	51
Figura 19: Grafico de cumplimiento de la demanda en los tres escenarios.....	51
Figura 20: Grafico de índice de cumplimiento en salud para los tres escenarios ..	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Resumen y comparación del estudio con los de 2013 y 2006	16
Tabla 2: Modelos multicriterio para la planeación de actividades de logística humanitaria	17
Tabla 3: Estadísticos de bondad del ajuste	31
Tabla 4: Resultados test de Durbin Watson.....	32
Tabla 5: Registro de intentos en la codificación del modelo	34
Tabla 6: Resumen de Capacidad para Kits de Ayuda Humanitaria, Albergados y Heridos por comuna.....	40
Tabla 7: Estratificación socioeconómica de las comunas 2, 17 y 19 de Cali	41
Tabla 8: Estimación de heridos.....	48
Tabla 9: Estimación de damnificados y kits	49

Lista de Ecuaciones

	Pág.
<i>Ecuación 1. Función Objetivo</i>	29
<i>Ecuación 2. Restricción de Capacidad</i>	29
<i>Ecuación 3. Restricción de limitación en los edificios a la demanda.....</i>	29
<i>Ecuación 4. Restricción de propósito único</i>	29
<i>Ecuación 5. Restricción de limitación en las comunas a la demanda.....</i>	30
<i>Ecuación 6. Restricción de distribución de los recursos equitativamente entre las comunas</i>	30
<i>Ecuación 7. Modelo de Regresión Lineal para la estimación de heridos.....</i>	31

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo 1. Matriz validada de clasificación de los recursos de Cali	61
Anexo 2. Matriz de clasificación de los recursos de Cali con columnas de capacidad	61
Anexo 3. Aplicación con los mapas de la infraestructura de Cali.....	62
Anexo 4. Imagen de Resultados del Código del modelo para el escenario 1	62
Anexo 5. Matriz con los resultados del modelo en el escenario 1.....	63
Anexo 6. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 1	64
Anexo 7. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 2	65
Anexo 8. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 3	66

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como objetivo caracterizar los recursos de infraestructura municipal de Cali para atender las consecuencias de un terremoto, de forma que se aborde la identificación de los recursos existentes, el cálculo de su capacidad y una propuesta para su utilización.

Para el desarrollo de este proyecto se recopiló información de los entes gubernamentales, se utilizó Google Earth para ubicar la infraestructura investigada y calcular su capacidad, además del software XLSTAT para construir el modelo de regresión lineal que se encarga de estimar el número de heridos que tendría cada comuna de acuerdo con el número de muertos que habría en tres escenarios diferentes planteados por Quiceno y Villegas (2018). Se presentan mapas del municipio de Cali con la infraestructura caracterizada que fueron realizados con ayuda de librería Unfolding Maps en el lenguaje Java, el mismo que se utilizó para el modelo matemático de asignación con la librería ILOG CPLEX Studio.

Finalmente, se ejecutó el modelo matemático para los tres escenarios obteniendo una asignación equitativa de los recursos para todas las comunas. Además, se identificó una demanda superior a la de la capacidad de la ciudad en el tema de salud, de manera que Cali no se encuentra preparada en este aspecto para atender las consecuencias causadas por un terremoto de magnitud 6,9 en la escala de Richter.

Palabras claves: Caracterización, Mapa, Modelo matemático, Terremoto, Capacidad, Uso.

Introducción

Colombia se encuentra ubicada en un territorio tectónico complejo debido a los sistemas de fallas de las placas litosféricas de Nazca, Caribe y Suramérica, particularmente el municipio de Cali se encuentra localizado en la zona de amenaza sísmica media y alta del país, por lo cual se encontrarían en peligro más de dos millones de personas que viven en esta ciudad (Pablo Marín Arias et al., 2008). Si se consideran casos de terremotos en localizaciones cercanas a Cali como lo fueron el de Popayán en 1983 y el Eje Cafetero en 1999, que dejaron miles de muertos y damnificados, se evidencia una necesidad importante para que la ciudad se prepare para dar respuesta a las consecuencias causadas por un posible terremoto (Ávila-Toscano et al., 2016).

El objetivo del presente proyecto es proporcionar una caracterización de los recursos de infraestructura del municipio de Cali para atender las consecuencias de un terremoto y así mismo, proponer una forma de utilización de estos recursos, de manera que se haga de forma equitativa, maximizando los niveles de atención en cada comuna de acuerdo con sus necesidades.

Para el desarrollo del proyecto se llevan a cabo tres etapas principales. La primera etapa es la identificación de los recursos de infraestructura municipal y su clasificación de acuerdo con las necesidades humanitarias que pueda suplir (albergue, salud, bodega). En la segunda etapa se estima la capacidad de estos recursos, es decir, cuantas personas se pueden albergar, atender o almacenar insumos en el edificio. Por último, se codifica en java un modelo matemático con el objetivo de maximizar la atención a personas y el almacenamiento de insumos en las comunas de la ciudad.

El motivo principal para desarrollar este proyecto de investigación es la brecha de conocimiento existente en los recursos de infraestructura disponibles en caso de un terremoto en la ciudad. Lo anterior, considerando que los resultados encontrados en este proyecto serán útiles para que los organismos municipales encargados de la atención de desastres puedan tomar decisiones rápidas y efectivas, basadas en datos confiables cuando se presenten terremotos en la ciudad.

1 Contexto, Formulación y Justificación del Problema

1.1 Contexto

Desde hace siglos la humanidad se ha visto afectada por diferentes fenómenos naturales devastadores que, por sus características y por resultar impredecibles, pueden tener consecuencias catastróficas siendo los terremotos uno de ellos (Tarela Alonso, 2012).

Los terremotos ocurren con frecuencia y pueden causar daños significativos y pérdida de vidas. De acuerdo con el Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS, por sus siglas en inglés (United States Geological Survey), los terremotos con una magnitud 7.0 en adelante ocurren en promedio 18 veces al año en todo el mundo. Muchas áreas densamente pobladas en todo el mundo están ubicadas cerca de regiones sísmicamente activas, además el daño por tsunami posterior al terremoto puede extenderse mucho más allá de las zonas propensas a sismos (O'Malley & Modal, 2019).

En la Figura 1 se aprecia el estudio de Nievas, Bommer, Crowley, & van Elk (2019) sobre un catálogo global de sismos con 141.524 eventos, los marcados en gris corresponden a los sismos que no produjeron daños; en naranja, 39.127 (27,6%) son considerados como potenciales causantes de daños, de los cuales 740 son eventos documentados con daños importantes y se representan en rojo.

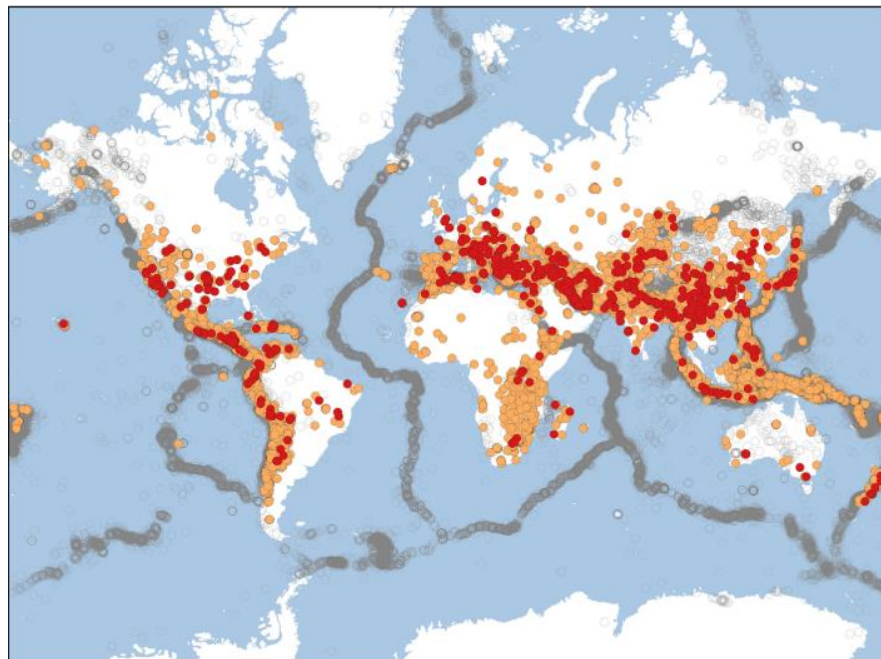


Figura 1: Catálogo global de terremotos con daños potenciales y daños documentados. FUENTE: (Nievas et al., 2019)

El territorio colombiano, geográficamente ubicado en la esquina noroccidental del continente suramericano, representa un ambiente tectónico complejo por lo visto en la Figura 1, aquí los procesos sísmicos son producto simultáneamente de la actividad que presentan los diferentes sistemas de fallas y de la dinámica de convergencia de las placas litosféricas de Nazca, Caribe y Suramérica. Cabe resaltar que las zonas de mayor actividad sísmica en Colombia están localizadas en la región de los Andes donde también se concentra más del 70% de la población (Pablo Marín Arias et al., 2008).

En la actualidad el 86% de la población colombiana se localiza en zonas de amenaza sísmica alta y media, en la primera de estas se encuentra Cali, que es el único municipio del país con más de un millón de habitantes que se encuentra en esta condición de riesgo, seguido por otras capitales como Cúcuta, Bucaramanga, Pereira, Villavicencio, Pasto y Manizales (Ávila-Toscano et al., 2016).

Entre las condiciones geológicas de la ciudad, se destacan tres tipos de fuentes sísmicas de importancia para la región: La “Zona de Subducción”, cuya traza superficial corre a unos 150-200 Km. paralela a la Costa Pacífica; La “Zona de Wadati-Benioff”; y, la Sismicidad tipo “Intraplaca”. Las fallas asociadas a esta trilogía de tipos de fuentes sismogénicas se distinguen en diversos aspectos genéricos como: su nivel general de actividad; su profundidad focal; contenido frecuencial de los movimientos generados en superficie y potencial de generar réplicas. Lo anterior, evidencia el alto nivel de vulnerabilidad de la ciudad a un terremoto y la necesidad de abordar el proceso de posdesastre desde una perspectiva más local (Cobo Lloreda et al., 2000).

La Figura 2 representa el diagrama de pescado utilizado para determinar las causas raíz del problema de que el proceso de atención posdesastre en Cali no involucra aspectos demográficos de la población y capacidad de los recursos, entre los cuales se encuentra la infraestructura. Después de revisar el Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de Cali (2018) y La Estrategia de Respuesta a Emergencias de Santiago de Cali (2018), se encontraron importantes falencias como la falta de información sobre los recursos y la ausencia de un plan detallado de atención por comunas dependiendo del nivel de riesgo sísmico y la población.

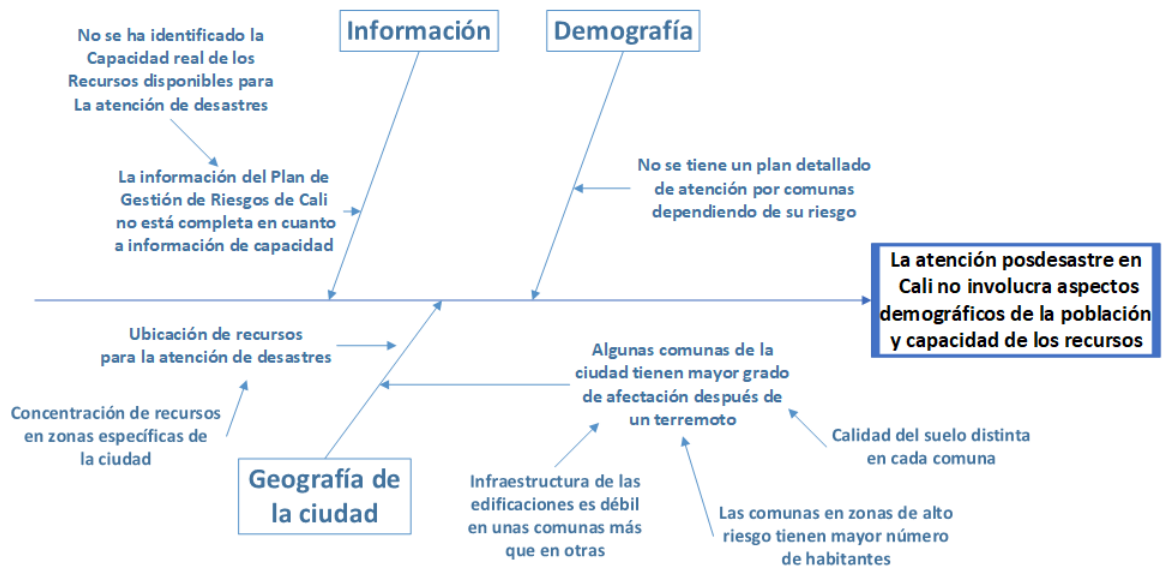


Figura 2: Análisis Causa-Efecto de la atención de desastres en Cali. FUENTE: Elaboración propia

1.2 Situación objeto de estudio

Los terremotos son desastres naturales que pueden presentarse de forma inesperada y afectar considerablemente la sociedad, la economía y demás. Actualmente, al ocurrir una situación de desastre, el proceso de evacuación no involucra aspectos demográficos de la población y capacidad de los refugios. Por lo anterior, existe una brecha de conocimiento que debe ser abordada, con el objetivo de que la distribución de los recursos de infraestructura municipal disponibles en Cali para la atención de terremotos se haga de manera equitativa.

1.3 Justificación de la situación objeto de estudio

El desarrollo de este proyecto de investigación es relevante para la comunidad del municipio de Cali dado que se aplican herramientas de ingeniería industrial que proporcionan información valiosa sobre los recursos de infraestructura disponibles en caso de un terremoto y la mejor forma de utilizarlos, maximizando la capacidad de atención a todos los afectados de la ciudad.

Los resultados encontrados en este proyecto serán útiles para que los organismos municipales encargados de la atención de desastres puedan tomar decisiones rápidas y efectivas, basadas en datos confiables cuando se presenten terremotos en la ciudad de Cali.

2 Objetivos

2.1 Objetivo del Proyecto

Caracterizar la infraestructura municipal de Cali para dar respuesta a las consecuencias de un terremoto.

2.2 Objetivos Específicos

1. Clasificar la infraestructura municipal disponible en Cali para la atención de desastres causados por terremotos.
2. Definir la capacidad de la infraestructura municipal disponible en Cali.
3. Proponer la forma en que se debe utilizar la infraestructura municipal disponible en Cali.

2.3 Entregables

1. Matriz de la infraestructura municipal disponible en Cali clasificada.
2. Mapas del municipio de Cali con la infraestructura municipal disponible caracterizada.
3. Escenarios de asignación de la infraestructura municipal disponible en Cali.

3 Marco de Referencia

3.1 Antecedentes o Estudios Previos

En la actualidad, existe una cantidad considerablemente amplia de literatura que está relacionada con la Gestión de Operaciones para Desastres o DOM, por sus siglas en inglés (Disaster Operations Management). Para dimensionar la pertinencia de estos documentos con respecto a nuestro objeto de estudio se tendrán en cuenta seis investigaciones, en las cuales los autores han desarrollado aspectos importantes, clasificaciones y nuevos desafíos para los estudios en el tema a nivel internacional.

En el trabajo de Altay & Green (2006) se lleva a cabo una revisión bibliográfica de la literatura existente en el campo de la Investigación de Operaciones y las Ciencias de Administración o OR/MS, por sus siglas en inglés (Operations Research/Management Science), en DOM. Fueron estudiados 109 artículos, y se emplearon seis diferentes métodos de clasificación: las afiliaciones de los autores, tipo de desastre, metodología de solución, etapa operacional, contribución de la investigación y finalmente un marco de clasificación diseñado previamente por Denizel, Usdiken, & Tuncalp (2003). Para la etapa de respuesta en DOM hasta el año 2004 se habían publicado 26 investigaciones, de las cuales solo 3 artículos están relacionados con terremotos.

Galindo & Batta (2013) continúan con la revisión que habían comenzado Altay & Green con el propósito de evaluar cómo ha evolucionado la investigación OR/MS en DOM entre los años 2005 y 2010, e identificar así nuevas brechas, tendencias, desafíos u oportunidades relevantes para el tema de estudio. Además de las mismas seis clasificaciones del estudio previo, se presenta un análisis de la validez de los supuestos empleados en cada documento, para de esta manera clasificarlos en tres categorías: razonable, limitado y surrealista. Fueron revisados 155 artículos y se encontró que no hay cambios drásticos en este campo de la investigación.

Lamos, Aguilar, & Acosta (2019) finalizan la revisión bibliográfica con el análisis de 117 artículos publicados entre 2010 y 2015, donde se muestra la evolución en las investigaciones relacionadas con el DOM. La Tabla 1 presenta una comparación entre las distintas revisiones mencionadas anteriormente, donde se puede evidenciar que la metodología más usada sigue siendo la programación matemática, seguida por la programación estocástica; además, en Lamos et al. (2019) se incluye una nueva metodología de minería de datos e inteligencia artificial, la cual no se tuvo en cuenta anteriormente debido a su reciente desarrollo. Por otro lado, en la Tabla 1 se observa que el porcentaje de investigaciones enfocadas en la fase de respuesta se ha incrementado y, en cuanto a la contribución de la investigación, se evidencia el decrecimiento de la

elaboración de modelos, debido posiblemente a que están más concentrados en la etapa de implementación de estos, nuestro proyecto se va a centrar en la elaboración de modelos.

Tabla 1: Resumen y comparación del estudio con los de 2013 y 2006. FUENTE: (Lamos et al., 2019)

	Our research	Galindo and Batta [7]	Altay and Green [2]
Number of articles	117	155	109
	%	%	%
Authors nationality			
USA	35.9	52.9	43.1
Other nations	44.4	28.4	42.2
International	19.7	18.7	14.7
Methodology			
Math Programming	40.2	23.1	32.1
Stochastic Programming	12.0	9.6	3.7
Decision Theory	11.1	9.0	10.1
Conceptual Analysis	7.7	16.0	NA
Simulation	5.1	9.0	11.9
Fuzzy sets	3.4	1.9	5.5
Systems Dynamics	3.4	1.3	1.8
Constraint Programming	0.0	0.6	0.9
Experts Systems and AI	0.0	3.8	3.7
Probability and Statistics	1.7	6.4	19.2
Data Mining and ML	1.7	NA	NA
Game Theory	0.9	1.3	NA
Queuing Theory	0.0	0.6	9.2
Soft OR	0.0	1.3	0.9
Combined Approach	12.8	11.6	NA
Operational Stage			
Mitigation	1.71	23.9	44.0
Preparedness	20.51	28.4	21.1
Response	48.72	33.5	23.9
Recovery	1.71	3.2	11.0
Multiple Stages	17.95	11	0.0
N.D.	9.4	NA	NA
Disaster type			
Natural	36.8	20.0	28.4
Men-Made	9.4	5.8	33.1
Humanitarian	6.8	2.6	0.9
All disasters	47.0	71.6	37.6
Research contribution			
Theory	24.8	19.3	26.6
Model	29.9	75.5	57.8
Application	45.3	5.2	15.6

De acuerdo con Esposito Amideo, Scaparra, & Kotiadis (2019) la instalación de refugios y la evacuación de poblaciones vulnerables son operaciones cruciales para la etapa de respuesta ante un desastre, en su publicación buscan identificar los desafíos de hoy en el desarrollo y aplicación de modelos de optimización para las operaciones mencionadas anteriormente mediante el análisis de nueve artículos relacionados con el DOM. Se presentan cinco aspectos que influyen en el

proceso de evacuación, estos son, tiempo del día, desvíos en las rutas, características demográficas, preferencias de ruta y señales de advertencia, donde se concluye que los tres primeros aspectos no fueron abordados en los artículos analizados. Finalmente, identifican un vacío en la utilización de nuevos enfoques basados en la equidad del proceso de evacuación, la definición de las zonas de evacuación y refugios, la disponibilidad de los recursos, y la comunicación e infraestructura, siendo estos los puntos de interés en nuestro proyecto.

Mejia (2012) presenta una revisión de documentos que han utilizado el enfoque de modelos multicriterio en logística de desastres naturales, en la Tabla 2 se puede apreciar un resumen de esta revisión indicando la metodología empleada y el problema que es abordado. La tabla se ha completado con referencias más recientes entre las que destaca el trabajo de Gaytán Iniestra, Arroyo López, & Colón (2012) que formula y resuelve un modelo de programación lineal entera mixta entre dos criterios, costo y tiempo total para la evacuación en una situación de inundación, que permite simultáneamente definir el número y localización de albergues y centros de distribución en una ciudad de México. Se evidencia un faltante de estudios multicriterio que consideren la equidad en la distribución luego de un terremoto.

Tabla 2: Modelos multicriterio para la planeación de actividades de logística humanitaria. FUENTE: Adaptado y extendido a partir de Mejia (2012)

Autores	Objetivos considerados y estrategia de solución	Descripción del problema que se resuelve
Barbarosoglu et al. (2002) citado por Mejia (2012)	Tiempo y costo. Aplican un método multicriterio interactivo para evaluar continuamente las soluciones no dominadas y filtrar la frontera eficiente según niveles de aspiración del grupo decisor.	Propuesta en dos fases para operaciones de desastre asistidas por helicóptero: Fase Táctica: Número de helicópteros y tripulación. Fase Operativa: Definición de rutas, para evacuación y entrega de ayuda en zonas afectadas bajo restricciones de itinerarios, transbordos y capacidad.
Özdamar et al. (2004)	Demanda insatisfecha. Modelo de flujo en redes multi-periodo.	Distribución de diversos artículos desde los centros de acopio a los de distribución ubicados en las zonas afectadas.
Altıparmak et al. (2006)	Costo, satisfacción de la demanda, desviación en el uso de la capacidad de instalaciones. Algoritmos genéticos.	Diseño de una red de suministro en Turquía considerando restricciones varias para el transporte de productos.

Autores	Objetivos considerados y estrategia de solución	Descripción del problema que se resuelve
Drezner et al. (2006)	Distancia de recorrido y equidad en la atención o distribución de ayuda. Búsqueda Tabú.	Localización de puntos para la recogida de heridos en Orange County, CA. Localización
Durán et al. (2007)	Tiempo de respuesta dado un presupuesto fijo. Modelo entero mixto de localización e inventario.	Localización de almacenes y determinación de la cantidad de inventario pre-posicionado para 48 productos que cubren necesidades básicas de una población afectada.
Balcik et al. (2008)	Demanda satisfecha y costo total. Modelación en dos fases: 1) Rutas por vehículo y 2) Uso de programación entera para definir períodos de entrega y cantidades.	Determinación del itinerario de entrega de suministros (período en que se visita cada punto de demanda, cantidades a entregar, cargas de los vehículos y rutas de entrega).
Doerner et al. (2009)	Costo, riesgo, cobertura y equidad. Algoritmo genético.	Localización de instalaciones y definición de rutas para distribuir ayuda en caso de tsunamis en Sri Lanka.
Yuan y Wang (2009)	Tiempo de evacuación y características de la ruta. Colonia de hormigas.	Diseño de rutas para la evacuación considerando daños provocados en rutas e información en tiempo real.
Nolz et al. (2010)	Distancia entre población y puntos de distribución, equidad, cobertura y costo. Algoritmo memético especial. Localización	Distribución de agua potable durante emergencia considerando cobertura en área afectada.
Vitoriano et al. (2010)	Costo del plan de distribución, tiempo de duración de las operaciones, equidad en la distribución, proporción de la demanda satisfecha en cada punto, confiabilidad de las operaciones y seguridad Programación por metas	Diseño de rutas para vehículos y selección del tipo de vehículos para distribuir una cantidad fija de ayuda humanitaria en una zona afectada por un desastre natural, caso de aplicación para el terremoto en Haití
Tinguaro-	Número de personas	Diseño de un Sistema de

Autores	Objetivos considerados y estrategia de solución	Descripción del problema que se resuelve
Rodríguez et al. (2011)	muertas, heridas, damnificadas y que quedaron sin hogar Lógica borrosa.	Evaluación y Diagnóstico de Desastres (SEDD = System of Evaluation and Diagnostics of Disasters) que pronostica las consecuencias de un desastre con base en información histórica y descripciones verbales de la situación.
Nolz et al. (2011)	Riesgo en el transporte de suministros, cobertura del sistema logístico y tiempo total de viaje Algoritmo memético complementado con un algoritmo específico que genera un mayor número de alternativas Pareto-óptimas.	Diseño de un sistema logístico que garantice la distribución adecuada de ayuda después de que ha ocurrido un desastre considerando los daños a la infraestructura en el área que puedan afectar la distribución de suministros.
Liberatore et al. (2012)	Seguridad de las vías de transporte, total de personas asistidas Modelo jerárquico ReCHADS que asigna prioridades de ayuda de tal manera que se logre la máxima cobertura (mayor número de personas asistidas). Se enlazan las actividades de distribución con las de recuperación.	Distribución de suministros a la población afectada por un desastre natural –el caso de aplicación es para el terremoto de Haití- considerando que la infraestructura de comunicación está afectada por lo cual no todos los vehículos pueden ir desde (hacia) los centros de distribución hacia (desde) las zonas afectadas.
(Gaytán Iniestra et al., 2012)	Ubicación de albergues y centros de distribución con un inventario pre-posicionado de paquetes de ayuda y asignación de individuos a albergues y rutas para su evacuación. Modelo Bi-criterio, sistemas de información geográfica y software especializado para simulaciones.	Diseño de plan de evacuación y distribución de los recursos para la población en caso de inundación, debido a la ocurrencia estacional de inundaciones en México y la vulnerabilidad de localidades como Villahermosa en el estado de Tabasco.

Para entender que tanto se ha estudiado el tema del DOM en el Valle del Cauca, se revisaron dos trabajos realizados previamente. El primero trata sobre la estimación de los impactos sociales y económicos causados por un terremoto para la ciudad de Cali usando un modelo de regresión lineal múltiple y a partir de los resultados obtenidos se construyeron mapas para identificar las zonas de mayor impacto en términos de la cantidad de muertos y casas destruidas, los escenarios más dramáticos se presentan por parte de la cantidad de casas destruidas (Quiceno & Villegas, 2018).

El segundo, trata sobre la aplicación de un modelo matemático para el diseño de redes de logística humanitaria en el municipio de Cali, específicamente para ubicación de centros de acopio buscando minimizar el costo de implementar la red, considerando los costos de apertura del centro, población afectada a la que atiende y los costos por transporte (Cardenas & Manrique, 2019).

3.2 Marco Teórico

La Real Academia Española (2014) define el término **caracterizar** como “determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás”, en el contexto del presente proyecto cuando se planea una caracterización de los recursos se refiere identificar, analizar, clasificar y definir un modo de uso de dichos recursos.

Los **recursos** son las personas, elementos, equipos y herramientas con las cuales se cuenta para evitar un desastre y atender de la mejor forma una situación de peligro. La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (2006) o FEMA, por sus siglas en inglés (Federal Emergency Management Agency), propone un sistema de clasificación de los recursos donde se tienen en cuenta las siguientes cinco definiciones para la información: Categoría, Clase, Componentes, Medidas y Tipo.

1. Categoría: Es la función para la cual un recurso podría ser más útil. Las siguientes son las 16 categorías que se usan en el protocolo estadounidense para la clasificación de equipos; Transporte, Comunicaciones, **Obras Publicas** e Ingeniería, Atención de Incendios, Información y Planeación, Aplicación de las Leyes y la Seguridad, Control de las Masas, Administración de los recursos, Salud y Medicina, Búsqueda y Rescate, Respuesta a Materiales Peligrosos, Agua y Comida, Energía Eléctrica, Información Pública, Problemas Animales y Agrícolas, Voluntariados y Donaciones.

2. **Clase:** Se refiere a clasificaciones generales para caracterizar recursos similares, como pueden ser, Equipos de Trabajo, Personal, Herramientas, Suministros, Vehículos, Edificios, etc.
3. **Componentes:** Los múltiples componentes que puede tener un recurso.
4. **Medidas:** Estándares de medición para identificar la capacidad, que pueden diferir de acuerdo con la clase de recurso y su misión.
5. **Tipo:** Define el nivel de **capacidad** que un recurso y puede variar según el alcance, tamaño o potencia, como por ejemplo las cajas de distintos tamaños, y por ende distintas capacidades, para almacenar alimentos. Esta clasificación les proporciona a los administradores más información para determinar el mejor modo de uso de los recursos.

Uno de los recursos de interés para esta investigación son los **kits de ayuda humanitaria** que están estandarizados por Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres o UNGRD (2013). Dichos kits son clasificados como: Kit Alimentario, con una composición para una duración promedio de 8 a 10 días y las siguientes dimensiones, Ancho: 34,2 cm X Alto: 28,4 cm X Profundo: 24 cm; Kit de cocina, con productos metálicos, plásticos y de alimentación para bebés y dimensiones: Ancho: 30 cm X Alto: 23.2 cm X Profundo: 30 cm; Kit Aseo Familiar, con productos de protección sanitaria para mujeres y otros artículos de higiene personal, dimensiones: Ancho: 34,2 cm X Alto: 28,4 cm X Profundo: 24 cm. Los kits de medicamentos son entregados a las entidades con línea de intervención en salud y contienen artículos para atender hasta 700 personas en 4 días.

Para la **atención médica** después de un desastre el Ministerio de Salud (2016) sostiene que los recursos de atención se clasifican de acuerdo a su capacidad, de primer nivel son los hospitales locales, centros de salud y puestos de salud; en segundo nivel se encuentran los hospitales regionales y de tercer nivel son hospitales universitarios y especializados. Cada uno de ellos debe establecer los planes de emergencia acordes a su nivel de complejidad.

Para las personas o familias que no pueden quedarse en su casa durante o después de un desastre natural, las ciudades cuentan con recursos físicos como la **infraestructura**, que está destinada a servir como albergues temporales, estos generalmente son lugares públicos como escuelas, edificios institucionales o centros comunales, esta infraestructura se acondiciona para recibir a las personas evacuadas, insumos de salud, kits de ayuda humanitaria y demás recursos que serán distribuidos para dar respuesta a la situación de emergencia (OPS, 2010).

La Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja define **Albergue** como: "Lugar físico creado e identificado como un lugar seguro, que cuenta con todos los medios necesarios para hospedar por un periodo corto, mediano y largo plazo a un grupo de personas afectadas por los resultados del impacto de una amenaza, con las garantías esenciales para garantizar la dignidad humana, conservando la unidad familiar y la cultura de las personas afectadas así

como su estabilidad física (mental) y psicológica. Promoviendo la organización comunitaria” (Cruz Roja Colombiana, 2008). La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que para alojamiento de emergencia se debe garantizar como norma 3,5 metros cuadrados por persona (OPS, 2010).

Por su parte los **terremotos** son los desplazamientos rápidos y las vibraciones causadas por el movimiento del suelo a lo largo de una fractura en una roca o en una falla. El movimiento ocurre cuando las rocas no pueden almacenar más tensión, en ese momento alcanzan su punto de ruptura, liberan energía y crean un terremoto. El punto de origen de un terremoto debajo de la superficie donde se libera su energía se conoce como el foco. El foco se puede ubicar a poca o poca profundidad. El punto en la superficie de la tierra directamente sobre el foco se llama epicentro; Es el lugar frecuentemente citado por los medios de comunicación como la ubicación del terremoto (Okulewicz, 2019).

A lo largo de la superficie terrestre, existen numerosas fallas y sistemas de fallas. Las fallas más grandes generalmente se limitan a áreas específicas. Los terremotos y las fallas no son peligrosos en sí mismos, pero pueden volverse peligrosos cuando ponen en riesgo a los humanos y su entorno inmediato. Cada año, la tierra está sujeta a por lo menos 1 millón de terremotos. Sin embargo, solo unos pocos son lo suficientemente fuertes como para causar daños estructurales importantes o causar víctimas. Los principales riesgos creados directamente por un terremoto son temblores de tierra, ruptura de tierra y tsunamis. Los principales riesgos indirectos son incendios, inundaciones, derrumbes de edificios, interrupción de los servicios públicos y efectos psicológicos (Okulewicz, 2019).

El conjunto de actividades y procesos destinados a limitar los impactos iniciales de desastres como los terremotos y volver a un estado de normalidad, es conocido como la Gestión de Operaciones para Desastres o **DOM**, por sus siglas en inglés (Disaster Operations Management). Cada una de las actividades asociadas con el DOM está contenida en una de las fases del ciclo de vida de la gestión de desastres, estas son Preparación, **Respuesta**, Recuperación y Mitigación (Altay & Green, 2006).

Tufekci y Wallace (1998) sugieren que el proceso de Respuesta a las emergencias tiene dos momentos, antes al evento y después del evento. Las actividades previas al evento incluyen la predicción y el análisis de peligros potenciales, así como el desarrollo de planes de acción para la fase de mitigación. Por otra parte, las actividades después del evento comienzan mientras el desastre está sucediendo, en esta etapa se busca ubicar, asignar, coordinar y **administrar los recursos disponibles**.

La administración de los recursos trae consigo un desafío con respecto qué criterios deben ser tenidos en cuenta para asegurar una justa distribución de estos. Es aquí donde la **equidad** adquiere un rol de interés para estudiar los desastres naturales. La definición de la Real Academia Española (2014) dice

“Igualdad de ánimo, propensión a dejarse guiar ... por el sentimiento del deber o de la conciencia, justicia natural”, en términos de la presente investigación, este concepto está asociado con el concepto de igualdad entre los grupos sociales de la población afectada por un desastre natural.

En la etapa de Respuesta para el momento después del evento, la gestión de los recursos se reduce a un **problema de asignación de los recursos** que busca asignar de manera óptima un número determinado de recursos a un conjunto dado de actividades para que se minimice el costo total de la asignación. Dependiendo del escenario y del enfoque de modelado, el problema puede ser lineal o no lineal, estocástico o determinístico y puede ser formulado como un problema de ubicación de instalaciones, entre otros (Altay, 2013).

Existe una amplia literatura sobre la aplicación de **modelos matemáticos y algoritmos de solución eficientes** para este tipo de problemas. Para una revisión completa y detallada de la teoría tras estos modelos y algoritmos, así como de los problemas de asignación de recursos, el lector es referido a los libros de Mjelde (1983) y Winston (2004) respectivamente.

En adición, un modelo de regresión lineal simple es un método estadístico que estudia la relación lineal existente entre dos variables y que permite hacer inferencias sobre ellas. Sin embargo, estos modelos deben cumplir con los supuestos de independencia, homocedasticidad y normalidad en los residuos. Para más información, se remite al lector al capítulo 13 del libro Estadística aplicada a los negocios y la economía de Lind et al. (2014).

3.3 Contribución Intelectual o Impacto del Proyecto

Este proyecto permite aportar al gobierno local herramientas que pueden ser utilizadas a modo de evaluación de los planes de respuesta para la atención de desastres causados por terremotos. La primera de estas es la consolidación y validación de la información de los recursos de infraestructura municipal con los que cuenta la ciudad para una situación de desastre y su capacidad, calculada a partir de las indicaciones de la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres (UNGRD), para el caso de los refugios y almacenamientos, y supuestos sobre los patrones de arribos a los centros de salud para definir la capacidad de estos.

El aporte antes mencionado se complementa con un mapa de la ciudad que cuenta con las demarcaciones de la ubicación de cada edificio y su respectiva capacidad, siendo este el aporte más significativo que se llevó a cabo en este proyecto, al presentar información, en su mayoría, real y gráfica del estado actual de los recursos del municipio que era desconocida hasta el momento.

Los escenarios de asignación de los recursos que fueron desarrollados con modelos matemáticos representan una contribución importante para el país en el tema de estudios DOM para la asignación de recursos, debido a que fueron consideradas dos principales características que no han sido muy estudiadas en el mundo cuando se aplican esta clase de modelos, la capacidad y la equidad en el momento de la distribución.

Finalmente, se considera que los resultados obtenidos en este proyecto significan una importante posibilidad para que, no solo el gobierno local, sino también toda la nación pueda tomar decisiones respecto a las políticas públicas de atención de desastres. Además, las propuestas presentadas representan una gran oportunidad para que a partir de estos hallazgos se realicen estudios aplicados con relación a las rutas de atención humanitaria y ubicaciones de interés para la instalación de albergues o centros de salud.

4 Metodología

4.1 Objetivo 1: Clasificar la infraestructura municipal disponible en Cali para la atención de desastres causados por terremotos.

Inicialmente se realizó la investigación preliminar para determinar las necesidades humanitarias más importantes al ocurrir un terremoto usando documentos gubernamentales. Para esto, según la UNGRD (2009) al ocurrir una situación de desastre se generan daños y/o pérdidas que ocasionan necesidades inmediatas de albergue, alimento, vestido y salud. Por lo anterior, se puede determinar que la infraestructura municipal útil para cubrir estas necesidades son los colegios, escuelas, escenarios deportivos, hospitales y centros de salud.

Para conocer y clasificar la información de la infraestructura municipal de la ciudad, se determinaron útiles la presencia de las siguientes columnas de datos:

- *Nombre:* corresponde a la denominación del recurso físico descrito.
- *Tipo:* es la función actual que desempeña el recurso. Estos son: institución educativa, sede institución educativa, hospital, centro de salud o puesto de salud.
- *Clasificación:* se refiere al uso que se le puede dar al recurso, el cual puede ser albergue, atención en salud y/o bodega.
- *Localización:* en esta columna se agrupa la información de dirección, comuna y coordenadas de latitud y longitud; las cuales serán útiles para ubicar geográficamente el recurso.

La información obtenida en el proceso de investigación se recopiló a partir de los datos disponibles en la Caracterización Socio-económica por Barrios de Santiago de Cali (2014), la base de datos de Instituciones Educativas Oficiales de Santiago de Cali (2017) y el Directorio de Unidades Recreativas y Polideportivos Públicos de Santiago de Cali (2016) que están publicados como datos abiertos por parte de la Alcaldía de Cali.

En primer lugar, se utilizó el documento de instituciones educativas para investigar en cada comuna los nombres en el buscador Google y de esta manera obtener más información que nos permitiera validar el nombre que se ingresó y clasificar cada centro educativo: en *Institución Educativas*, para el caso de las sedes principales de una institución oficial; y en *Sede Institución Educativa*, cuando se tratase de las sedes satélite de las instituciones. Luego de transcribir el nombre y tipo de cada entrada se continuó con los datos de localización de cada complejo, comenzando con su dirección, la cual se encontraba documentada en la base de datos, pero fue validada con ayuda de las funciones de localización geográfica Maps y Street View de Google. Además, con ayuda de estas herramientas

mencionadas se extrajo la latitud y longitud de cada espacio. Adicionalmente, se realizó el mismo procedimiento para la clasificación de los *escenarios deportivos* usando el documento que consolida la información sobre los polideportivos y unidades recreativas de la ciudad teniendo en cuenta que no se usaron todos los escenarios deportivos sino los que fueran cerrados, grandes e idealmente con techo.

Continuando con los complejos de salud, se utilizó principalmente el documento del inventario municipal para revisar cada barrio de cada comuna y obtener la cantidad de recursos de infraestructura del sector salud, así como su nombre y dirección. Con esta información se identificó el uso actual que tiene cada una de estas entradas y se asignó un tipo, de acuerdo con los servicios prestados; Estos son: *Hospitales, Centros de Salud y Puestos de Salud*. Una vez validados los nombres y direcciones con las mismas herramientas que para las instituciones, se determinaron sus coordenadas.

En tercer lugar, se realiza la clasificación de la infraestructura municipal, teniendo en cuenta las necesidades previamente establecidas y las condiciones mínimas que debe tener un albergue, de acuerdo con la Cruz Roja (2008); establecimiento de atención en salud, según el Ministerio de Salud (2016) y las bodegas de almacenamiento, conforme con la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres UNGRD (2013b). Es importante resaltar que los edificios del sector educación y deporte son apropiados para ser empleados ya sea como Albergues o como Bodegas, así que les fueron asignadas estas clasificaciones.

Finalmente, fue realizada una validación de la información encontrada sobre los recursos de infraestructura del municipio de Cali con el doctor Guillermo Velasco Echeverry, responsable de Emergencias y Desastres de la Secretaria de Salud local y con Fabian Hernández, funcionario de la Secretaria de Gestión del Riesgo en el municipio.

4.2 Objetivo 2: Definir la capacidad de la infraestructura municipal disponible en Cali.

Inicialmente, para definir la capacidad de los polideportivos, estadios y unidades recreativas, no se contaba con información apropiada para realizar una estimación, así que se determinó el área de cada escenario deportivo identificado en el objetivo 1 usando la herramienta Google Earth, la cual permite tomar medidas aproximadas de un espacio ubicado en el mapa. Después de tener el área de estos escenarios deportivos, se evaluaron dos alternativas de uso para estimar su capacidad. La primera, son los albergues para los que se tuvo en cuenta el espacio que sugiere la OMS de 3.5 m² para la ubicación de una persona;

de esta manera, al dividir el área de un escenario deportivo entre esta medida unitaria, se obtuvo la cantidad de personas que se podrían albergar en el lugar.

La segunda alternativa son las bodegas, para las cuales se determinó la unidad de medida de un kit humanitario que estaría compuesto por los ya mencionados, en el marco teórico, kits de alimentos, de cocina y de aseo familiar, como se puede apreciar en la Figura 3. Donde primero se combinan fácilmente los kits de alimentos y aseo debido a que tienen las mismas dimensiones y finalmente el kit de cocina se ajusta de manera que pueda conformar una forma cubica sin disminuir su volumen en el kit final completo, que cuenta entonces con las dimensiones 49.5cm X 48 cm X 28.4 cm.

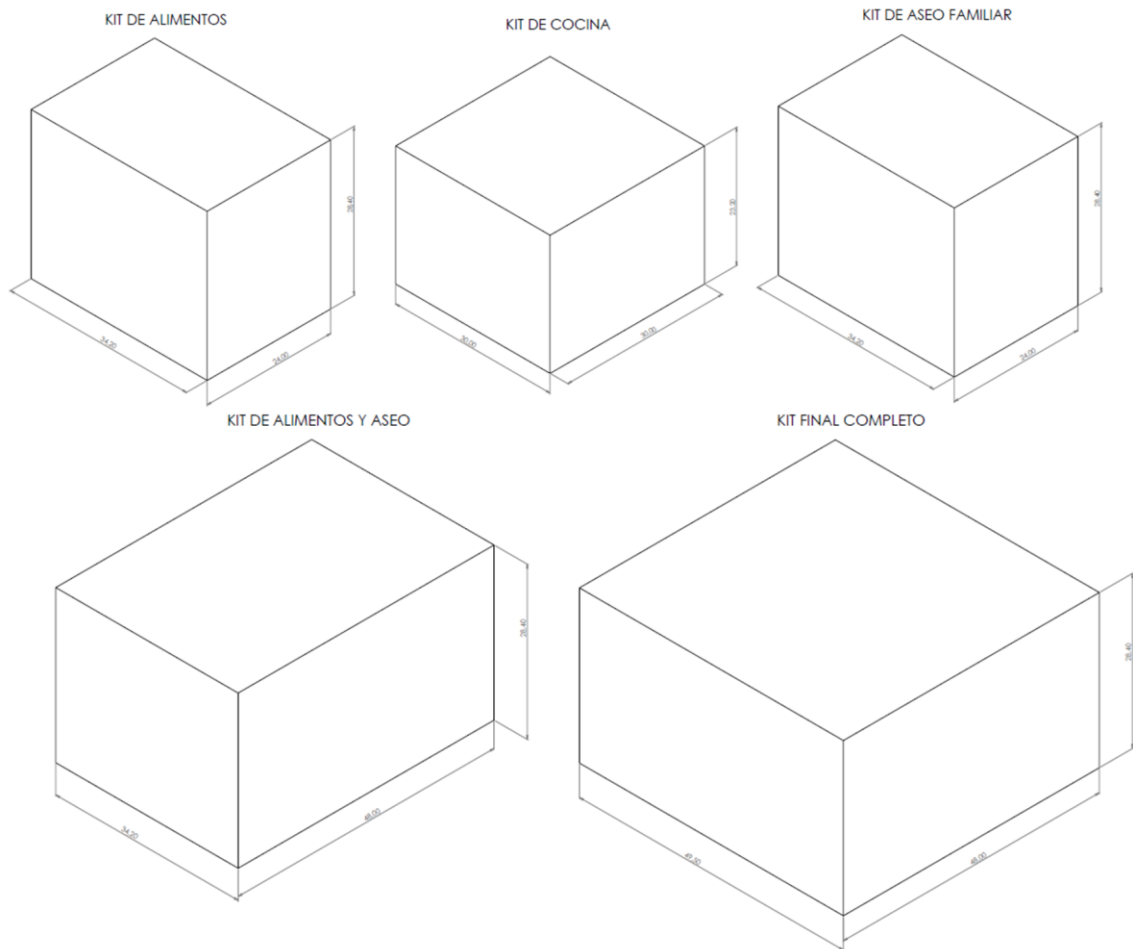


Figura 3: Ajuste las dimensiones de un kit de ayuda humanitaria. FUENTE: Elaboración propia.

Después se dividió el área del escenario deportivo entre el área que tendría el kit final ($49.5 \text{ cm} \times 48 \text{ cm} = 2376 \text{ cm}^2 = 0.2376 \text{ m}^2$) y se multiplicó por tres, bajo el supuesto de que estas cajas pueden apilarse una sobre la otra hasta tres veces lo que sería menos de 1 metro de altura, para obtener finalmente el número total de kits que se podrían almacenar en el lugar.

Para el tema de atención médica, se utilizaron datos de capacidad establecidos por la secretaria de salud que se encuentran disponibles en el REPS (Registro Especial de Prestadores de Salud). Dicha capacidad esta medida de acuerdo con la cantidad de camas disponibles para atención en Urgencias, Unidad de Cuidados Intensivos, Hospitalización y Pediatría. Adicionalmente debido a que la secretaria de salud solo cuenta con esta capacidad para los 36 hospitales grandes de la ciudad, el equipo de trabajo de dicha dependencia afirmó que esta capacidad se debe incrementar en un 30% para tener en cuenta las camas que tendrían los puestos y centros de salud que también podrían ser utilizados.

Por último, se consolidó la información recolectada añadiendo las columnas de capacidad a la matriz validada obtenida en el objetivo anterior, con la cual, a partir de programación en Java Eclipse con la librería Unfolding Maps y utilizando la información de localización, fue posible crear los archivos geojson que son las entradas para realizar el mapa de la ciudad con la infraestructura disponible y su capacidad.

4.3 Objetivo 3: Proponer la forma en que se debe utilizar la infraestructura municipal disponible en Cali.

Para lograr el tercer objetivo, se planteó un modelo matemático de asignación de recursos, con el objetivo de maximizar la atención a las necesidades de infraestructura de la ciudad para atender un terremoto. El modelo antes mencionado se presenta a continuación:

4.3.1 Modelo de Programación Lineal Entera

Definición de Conjuntos

I = Conjunto de edificios de la ciudad

J = Conjunto de usos para los edificios de la ciudad (Atención de salud, Albergue, Bodega)

K = Conjunto de comunas de la ciudad

Parámetros

A_{jk} = Demanda del uso j en la comuna k

B_{ij} = Capacidad del edificio i para el propósito j

E = Porcentaje mínimo de asignación equitativa de recursos en cada escenario.

Variables

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & : \text{Si el edificio } i \text{ se utiliza para el propósito } j \\ 0 & : \text{Lo contrario} \end{cases}$$

X_{ijk} = Cantidad de asignados en el edificio i para el propósito j que provienen de la comuna k

Función Objetivo

$$\text{Max } Z = \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk}$$

Ecuación 1. Función Objetivo

Esta función representa la maximización de la atención en salud, albergue y bodega en la ciudad.

Restricciones

1. Capacidad

$$\sum_k X_{ijk} \leq B_{ij} * Y_{ij} \quad \forall i, j$$

Ecuación 2. Restricción de Capacidad

Esta restricción garantiza que la asignación de heridos, damnificados o recursos no exceda la capacidad del edificio utilizado.

2. Limitación en los edificios a la Demanda

$$\sum_i X_{ijk} \leq A_{jk} \quad \forall j, k$$

Ecuación 3. Restricción de limitación en los edificios a la demanda

En esta restricción se plantea que las asignaciones en los edificios de cada comuna y propósito, no excede la demanda que se plantea.

3. Propósito Único

$$\sum_j Y_{ij} \leq 1 \quad \forall i$$

Ecuación 4. Restricción de propósito único

Esta restricción plantea que cada uno de los edificios de la ciudad puede tener un único uso o propósito, ya sea con fines de salud, albergue o bodega. Cabe notar que, en el caso de los escenarios deportivos, una vez que se decida si su uso será el de albergue o bodega, se considera la capacidad para ese propósito.

4. *Limitación en las comunas a la Demanda*

$$\sum_i \sum_j X_{ijk} \leq \sum_j A_{jk} \quad \forall k$$

Ecuación 5. Restricción de limitación en las comunas a la demanda

Esta restricción tiene la finalidad de garantizar que no se realizan más asignaciones en una comuna de las que se han demandado.

5. *Distribución equitativa*

$$E \leq \frac{\sum_i X_{ijk}}{A_{jk}} \quad \forall jk$$

Ecuación 6. Restricción de distribución de los recursos equitativamente entre las comunas

Esta última restricción tiene como objetivo asegurar que se realice equitativamente una asignación de recursos de acuerdo con las necesidades de cada comuna con una atención de por lo menos el E por ciento. El valor de E varía de acuerdo con el escenario por lo que existen tres valores diferentes.

4.3.2 Cálculo de Parámetros del Modelo

El parámetro de capacidad de los edificios y sus usos se obtuvo de los objetivos 1 y 2 del presente documento, en el caso de la demanda fueron necesarias una serie de estimaciones a partir de tres escenarios de riesgo que son variaciones de un simulacro del PLEC de Santiago de Cali, elaborado por el CLOPAD, bajo la dirección de la Alcaldía. Dicha situación plantea un sismo de magnitud 6,9 en la escala de Richter, profundidad de 30 km y un epicentro a 40 km de la ciudad con dirección oriente, el primer escenario toma la distancia rectilínea de las comunas hasta el epicentro, mientras que el escenario dos ubica el epicentro hacia la diagonal inferior y el escenario tres hacia la diagonal superior (Quiceno & Villegas, 2018).

Para la estimación del número de heridos se utilizó un modelo de regresión lineal, en donde se busca que la variable X (*muertos*) explique el comportamiento de la variable Y (*heridos*). Los datos se tomaron del proyecto de grado de Quiceno y

Villegas (2018) donde se registran 6180 de los terremotos más importantes de la historia del mundo recolectando información útil para esta investigación como el número de muertos y heridos en cada suceso. Sin embargo, la información no estaba completa para todos los terremotos, por lo que se realizó un filtro considerando los terremotos con la información completa y los sucedidos en los países del cinturón de fuego del pacífico obteniendo un tamaño de muestra de 399.

La Tabla 3: Estadísticos de bondad del ajuste muestra los coeficientes de ajuste del modelo. El R² (coeficiente de determinación) proporciona una idea del % de variabilidad de la variable a modelizar, explicado por la variable explicativa. Mientras más cerca está de 1 este coeficiente, mejor es el modelo. Para este caso, 93% de la variabilidad del número de heridos en un terremoto es explicada por el número de muertos. En la Ecuación 7. Modelo de Regresión Lineal para la estimación de heridos se encuentra el modelo resultante.

Tabla 3: Estadísticos de bondad del ajuste. FUENTE: Elaboración propia

Observaciones	399
Suma de los pesos	399
GL	397
R ²	0,929
R ² ajustado	0,929
MEC	139392264,947
RMSE	11806,450
MAPE	1125,780
DW	1,995
Cp	2,000
AIC	7484,363
SBC	7492,341
PC	0,071

$$Heridos = -117,1928 + (3,1628 Muertos)$$

Ecuación 7. Modelo de Regresión Lineal para la estimación de heridos

Para utilizar el modelo de regresión se comprobaron los supuestos de independencia, homocedasticidad y normalidad en los residuos. Para la independencia, se realizó la prueba de Durbin Watson donde se concluyó la independencia en los residuos, pues el estadístico de Durbin Watson (DW) arrojó

un valor de 2 como se observa en la Tabla 4: Resultados test de Durbin Watson, se analiza el diagrama de dispersión observado en la Figura 4: Gráfico de homocedasticidad, donde se presentan los pronósticos de heridos contrastados con los residuos estandarizados. Al analizar esta figura se observa que los residuos se distribuyen de manera aleatoria y que, a pesar de la acumulación de datos en el punto 0, no se observa algún patrón en su comportamiento. Por lo tanto, no se puede decir que no hay homocedasticidad en los residuos.

Tabla 4: Resultados test de Durbin Watson. FUENTE: Elaboración propia

Prueba de Durbin-Watson (Orden = 1):	
DW	1,995
rho	0,002
valor-p (unilateral)	0,962
alfa	0,05

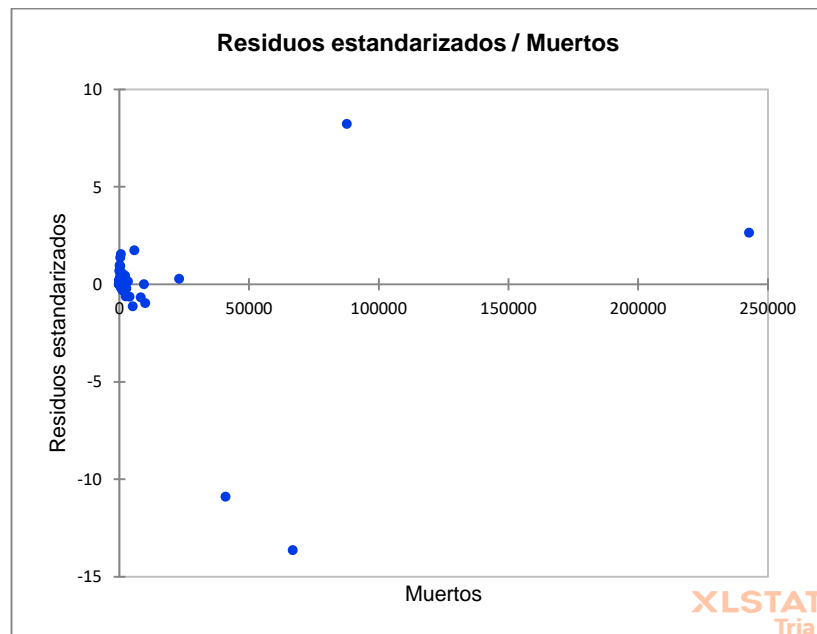


Figura 4: Gráfico de homocedasticidad

En cuanto a la normalidad, se realizó la prueba de Shapiro Wilk obteniendo que con un 95% de confianza se debe rechazar la hipótesis nula y aceptar la alternativa, lo cual significa que los residuos no siguen una distribución normal (Figura 5: Gráfico de probabilidad normal de los residuos).

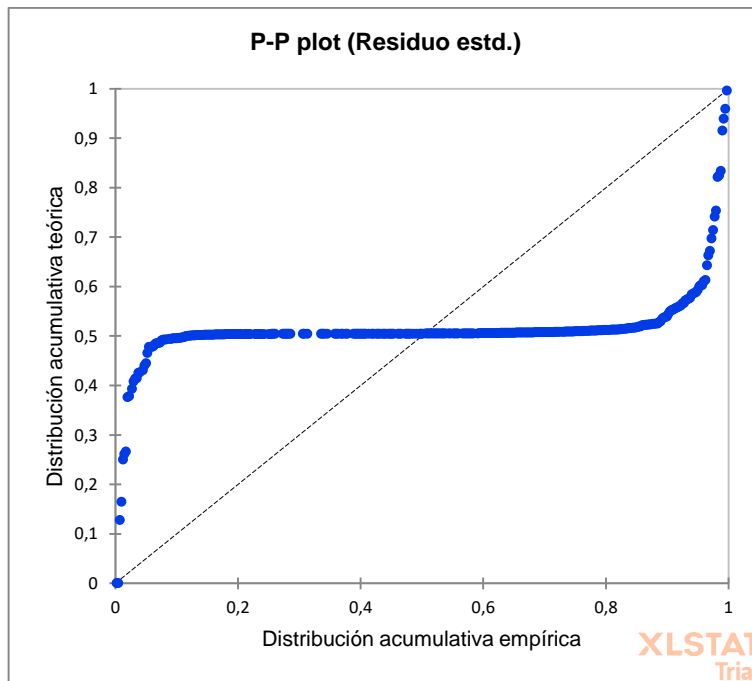


Figura 5: Gráfico de probabilidad normal de los residuos.

En conclusión, del modelo de regresión se puede decir que los errores no son normales, pero si independientes y la transformación de los datos no se encuentra dentro del alcance del presente proyecto, por lo que el modelo es suficiente para hacer una inferencia sobre el número de heridos a partir de los muertos en cada comuna.

Para estimar el número de personas que requieren albergue se extrajo del Departamento Administrativo de Planeación Municipal (2019) el número de habitantes y viviendas por comuna. Luego, se calculó el número promedio de habitantes por vivienda para cada comuna. Finalmente, se extrae del trabajo de Quiceno y Villegas (2018) el número de viviendas destruidas que, al ser multiplicado por el promedio de habitantes por vivienda, da como resultado el número de damnificados. Este proyecto se desarrolló bajo el supuesto de que cada persona damnificada requeriría un kit de ayuda humanitaria, por lo que la demanda del espacio de almacenamiento de bodega sería igual al de los albergues.

4.3.3 Solución del modelo

Como se mencionó anteriormente el modelo fue codificado en Java Eclipse, esto se realizó progresivamente partiendo de una situación con tres edificios, tres comunas y los ya conocidos tres propósitos, usando datos aleatorios fáciles de controlar para de esta manera poder realizar pruebas de escritorio con los resultados que generaba el modelo en cada experimento. Luego de cada intento se agregaron nuevas restricciones, correcciones o datos, se evaluaban los resultados de la función objetivo y el tiempo que le toma a la maquina llegar a la solución óptima. En la Tabla 5 se encuentra un resumen del registro de los datos obtenidos con el paso del tiempo hasta antes de aplicar el modelo directamente en los escenarios estudiados.

Tabla 5: Registro de intentos en la codificación del modelo. FUENTE: Elaboración propia

Intento	# Restricciones	# Variables	Función Objetivo	Tiempo (s)
1	9	27	60	0
2	30	27	51	0
3	21	27	47	0
4	21	27	21	0.02
5	30	27	15	0.02
6	74	45	15	0.01
7	120	75	15	0
8	9866	9240	401359	0.20
9	9998	9240	401359	0.07
10	9932	9240	401359	0.07

5 Resultados

5.1 Objetivo 1: Clasificar la infraestructura municipal disponible en Cali para la atención de desastres causados por terremotos.

5.1.1 Resultados

El principal resultado encontrado es la matriz de recursos clasificados (Anexo 1. Matriz **validada de clasificación de los recursos de Cali**) en donde se consolida y clasifica toda la información recolectada sobre los recursos de infraestructura del municipio de Cali. Con base en esta matriz, se extraen los hallazgos más importantes que van a ser presentados a continuación.

Como resultado preliminar, se encontraron 509 recursos municipales de infraestructura en Cali. La Figura 6: Tipo de recursos de infraestructura preliminar del municipio de Cali. FUENTE: Elaboración propia. permite observar que el 41% de estos establecimientos son sedes de instituciones educativas, el 20% son escenarios deportivos, el 16% son instituciones educativas principales, el 10% son puestos de salud, el 7% son hospitales y el 6% son centros de salud. Sin embargo, al consultar a la Secretaría de Educación de Cali sobre las características de las instituciones educativas, específicamente su capacidad en términos del número de estudiantes actuales no fue posible acceder a esa información y, por el contrario, se recibió un comunicado sobre el impedimento de la utilización de establecimientos educativos como albergues o bodegas en caso de un terremoto, pues según la Directiva Ministerial No. 12 de Julio de 2009 (Velez, 2009), en situaciones de emergencia se debe garantizar el derecho a la educación, por lo tanto, la atención de emergencias debe ser realizada en establecimientos distintos a los educativos.

Además, después de hablar con el doctor Guillermo Velasco Echeverry, se encontró que, en una situación de emergencia causada por un terremoto, las entidades prestadoras de salud que podrían atender la situación son las que cuentan con el servicio de urgencias. Por lo tanto, en la realidad la mayor cantidad de heridos serían atendidos en alguno de los 36 hospitales grandes y dependiendo de la situación, solo unos pocos serían dirigidos a los puestos y centros de salud.

Al descartar la utilización de establecimientos educativos en situaciones de emergencia, se obtendría que los recursos de infraestructura considerados por el gobierno para la atención de un terremoto se reducen a 140 (Figura 7) los cuales 104 son escenarios deportivos que pueden ser utilizados como albergues y/o bodegas y, 36 son hospitales que prestarían el servicio de atención en salud.

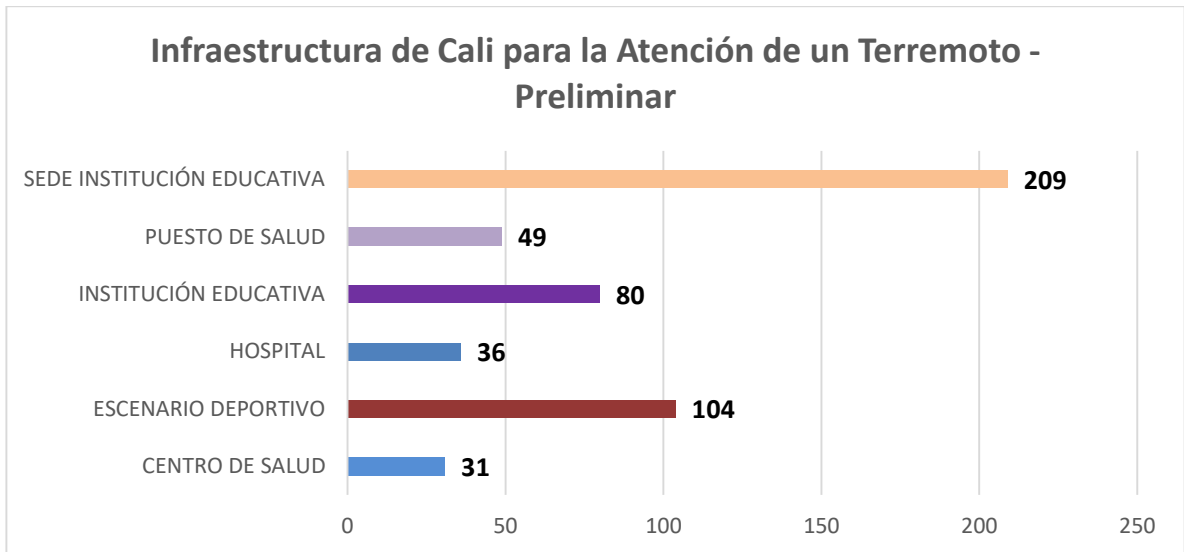


Figura 6: Tipo de recursos de infraestructura preliminar del municipio de Cali. FUENTE: Elaboración propia.

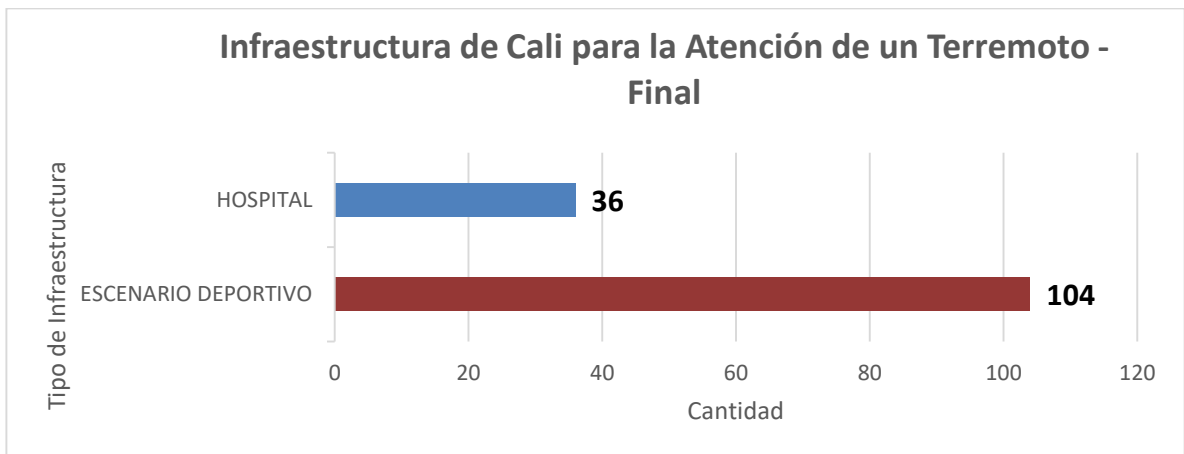


Figura 7: Tipo de recursos de infraestructura real del municipio de Cali. FUENTE: Elaboración propia.

Ahora bien, en la Figura 8 se evidencia la desigualdad en la cantidad de tipo de recursos por comuna. Al analizar la infraestructura por sectores (salud y deporte) se evidencia que la comuna 22 no cuenta con infraestructura para cubrir las consecuencias de un terremoto, pues en este sector no se encuentran ubicados hospitales ni escenarios deportivos aptos para tal fin; mientras que, en la comuna 19 se concentra la mayor cantidad de estos establecimientos, encontrándose 14 hospitales y 14 escenarios deportivos. Así mismo, se observa que las comunas 1,

4, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 21 y 22 no se encuentra ningún hospital de capacidad aceptable para atender las consecuencias de un terremoto en temas de salud.

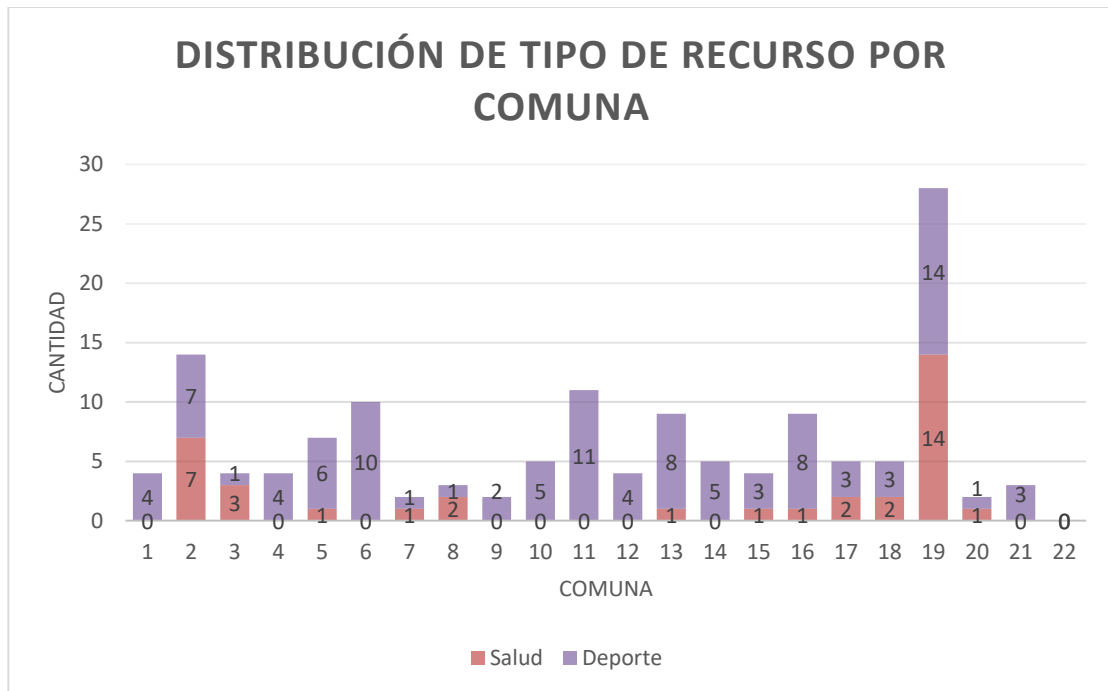


Figura 8: Cantidad de tipo de recursos por comuna. FUENTE: Elaboración propia

Finalmente, se obtuvo la clasificación de los recursos de infraestructura observada en la Figura 9, en donde se evidencia que el 74% de los establecimientos encontrados pueden ser usados como albergue y/o bodega, mientras que el 26% serían usados para prestar el servicio de atención en salud.

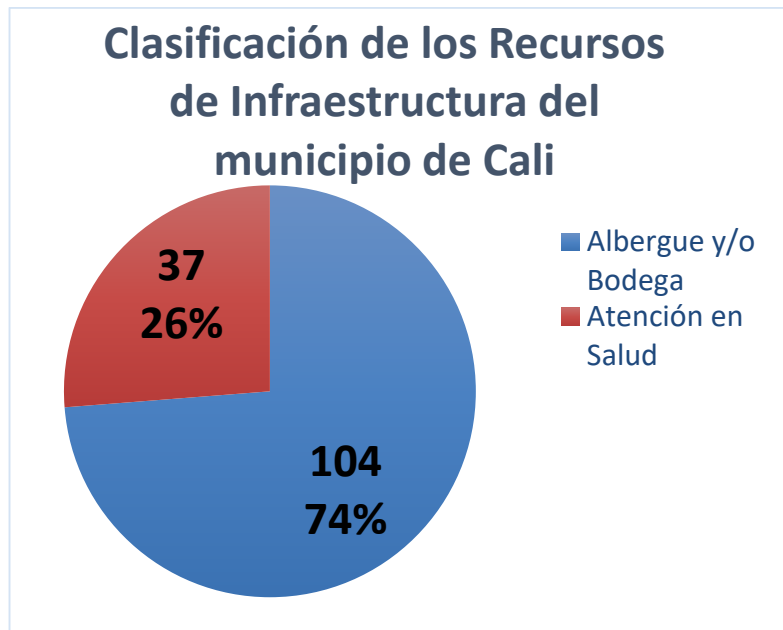


Figura 9: Clasificación de los recursos de infraestructura del municipio de Cali. FUENTE: Elaboración propia

5.1.2 Discusión

La visión del gobierno es rígida, con muchas limitaciones causadas por decretos y presupuestos. Es una visión esperadora del desastre y no anticipativa, pues en el proceso de toma de decisiones para dar respuesta a diferentes eventos, se presentan vacíos en el conocimiento previo de la infraestructura municipal y se espera a que suceda una emergencia para valorar los diferentes recursos disponibles y su posible utilización. Por otro lado, en el presente trabajo se presenta una visión desde la academia, donde se plantea la utilización de instituciones educativas, pues ante un desastre el tema de educación pasará a un segundo plano en el momento inmediatamente posterior al suceso, por lo que se debe actuar de manera rápida con los recursos disponibles.

En Cali existe una infraestructura que el gobierno reconoce como utilizable (escenarios deportivos y hospitales) y una infraestructura que no puede ser utilizada debido a regulaciones, como lo son las instituciones educativas. Sin embargo, esto no significa que este tipo de recursos no deban ser caracterizados, pues a pesar de que actualmente un decreto impide su uso, es importante tener conocimiento de estos establecimientos, ya que en una situación de desastre las autoridades se pueden ver en la necesidad de tomar la decisión de usarlos y estos espacios pueden representar una gran capacidad de respuesta ante una situación de estas y beneficiaría en gran manera a toda la comunidad.

5.1.3 Conclusiones

En las comunas 1, 4, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 21 y 22 de Cali no fue posible identificar recursos del tipo considerado en este trabajo, lo cual dificultaría su capacidad de reacción frente a las consecuencias de un desastre natural. Lo anterior trae consigo problemas para la logística de atención de desastres en estas partes de la ciudad, ya que los afectados van a requerir ser movilizados mayores distancias para alcanzar un espacio seguro para refugiarse, recibir atención médica y abastecerse de suministros básicos para su supervivencia.

En la ciudad existen recursos como las instituciones educativas que podrían ser utilizadas como albergues y/o bodegas en una situación de emergencia. Sin embargo, la legislación colombiana no permite hacerlo, por lo que sería importante que los entes gubernamentales discutan esta medida, pues en una situación de emergencia puede resultar indispensable la utilización de este tipo de recurso de forma momentánea para lograr atender las necesidades humanitarias en la fase de respuesta inmediata.

Además, Cali es un municipio que cuenta con pocos hospitales, por lo que, al generarse un terremoto, su capacidad de respuesta a problemas graves de salud puede ser limitada y no cubrir a toda la población.

Por último, esta matriz de la infraestructura de la ciudad es importante ya que será una base de datos confiable para la toma de decisiones y mejoramiento del proceso de respuesta ante terremotos por parte de la Secretaría de Atención y Prevención de Desastres del municipio de Santiago de Cali.

5.2 Objetivo 2: Definir la capacidad de la infraestructura municipal disponible en Cali.

5.2.1 Resultados

Luego de llevar a cabo la recopilación de la información relacionada con la capacidad de la infraestructura validada y realizar los cálculos correspondientes, se obtuvieron los resultados por comuna que pueden visualizarse en la

Tabla 6, y además hacen parte de la matriz de clasificación de los recursos en las nuevas columnas de capacidad como se puede ver en el Anexo 2. **Matriz de clasificación de los recursos de Cali con columnas de capacidad** (para apreciar la matriz completa puede visitar la [Matriz de Infraestructura Clasificada](#)).

Tabla 6: Resumen de Capacidad para Kits de Ayuda Humanitaria, Albergados y Heridos por comuna.
FUENTE: Elaboración propia

CAPACIDAD			
COMUNA	KITS	PERSONAS	CAMAS
1	91172	2061	0
2	1014442	22953	1038
3	8434	190	627
4	415806	9408	0
5	716916	16220	23
6	1193114	26995	0
7	31073	703	54
8	79393	1796	67
9	103926	2351	0
10	747788	16920	0
11	905397	20483	0
12	206627	4674	0
13	397079	8982	41
14	159278	3602	0
15	200630	4539	41
16	574757	13003	13
17	195705	4427	866
18	201513	4559	254
19	1709423	38678	2507
20	5050	114	22
21	33080	747	0
22	0	0	0
TOTAL	8990603	203405	5553

De acuerdo con los datos obtenidos es importante notar que como en la comuna 22 no se identificó infraestructura para la atención de un desastre, entonces su capacidad sería nula en la situación antes mencionada. Las comunas 2, 17 y 19 son las que tienen una gran acumulación de estos recursos y de acuerdo con la Tabla 7 en estas comunas residen principalmente personas de estratos socioeconómicos altos (4 y 5). Adicionalmente, según el Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Cali (2019) en las tres comunas antes mencionadas hay 392.191 habitantes, lo que representa el 17 % de la población total del municipio (2'400.112), mientras que en la comuna 22 habitan 12.343 personas que son el 0,51 %. Entonces, la comuna 22 tiene la menor cantidad de habitantes en la ciudad y no cuenta con el tipo de recursos analizados en el presente trabajo investigativo.

Tabla 7: Estratificación socioeconómica de las comunas 2, 17 y 19 de Cali. FUENTE: (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2018)

COMUNA	ESTRATOS					
	1	2	3	4	5	6
17	0	4	177	627	920	98
19	34	112	93	1127	743	114
2	114	33	279	895	890	212
Total	148	149	549	2649	2553	424

Para analizar más detenidamente la división de los recursos de infraestructura en el municipio de Cali para la atención de un terremoto, las Figura 10 a la Figura 12 presentan la capacidad por comunas para los kits de ayuda humanitaria, personas albergadas y atención de heridos, respectivamente.

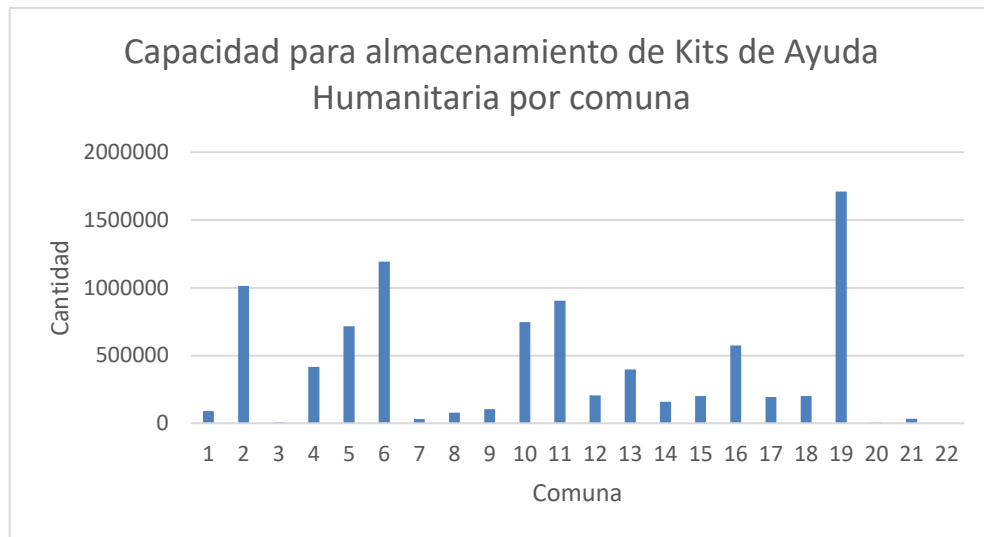


Figura 10: Capacidad para almacenamiento de kits de ayuda humanitaria por comuna. FUENTE: Elaboración propia

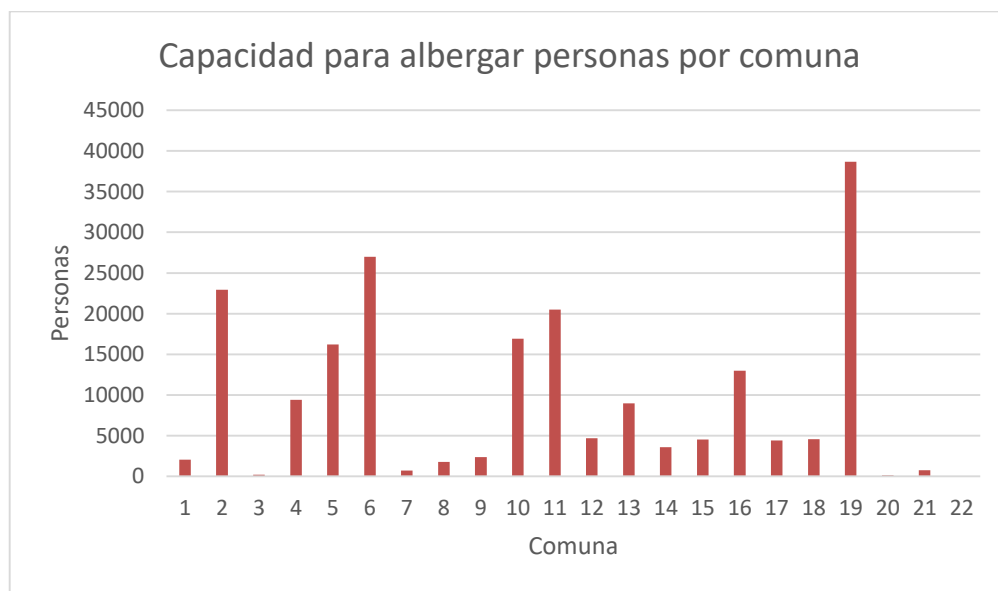


Figura 11: Capacidad para albergar personas por comuna. FUENTE: Elaboración propia

Es importante considerar nuevamente que los escenarios deportivos tienen la posibilidad de ser utilizados como albergue o como bodega, por lo tanto, su capacidad se determinó para cada rol, pero se trata de la misma infraestructura. Teniendo en cuenta lo anterior, se pudo evidenciar como la comuna 19 destacó por su capacidad para albergar personas y/o equipos. Mientras que las comunas 1, 3, 7, 8, 9, 20, 21 y 22, destacaron por su muy baja o nula capacidad.

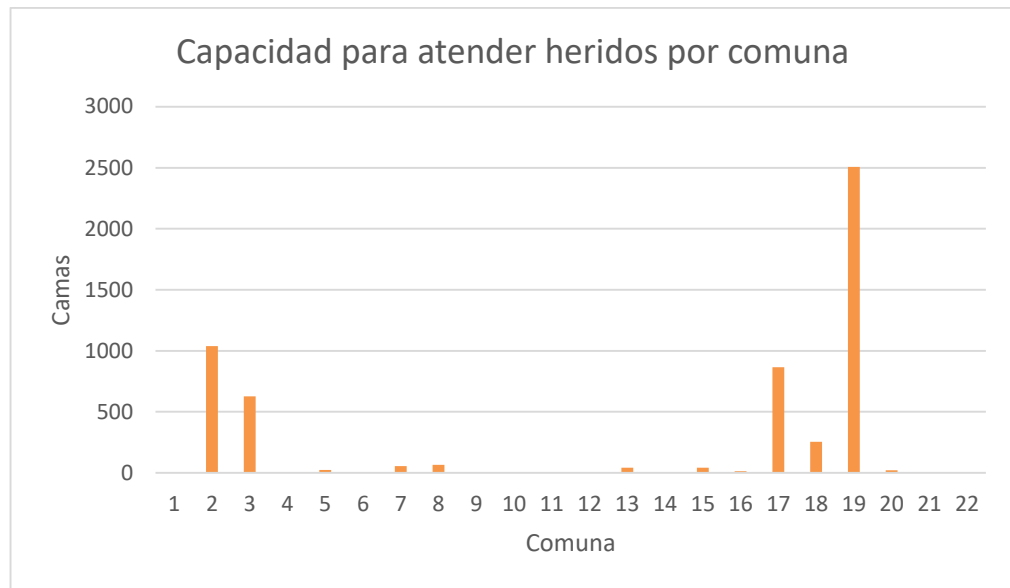


Figura 12: Capacidad en cantidad de camas para heridos por comuna. FUENTE: Elaboración propia.

En términos de salud, la ciudad tiene concentrados sus hospitales principalmente en el sur de la ciudad, en la comuna 19 y 17, algunos se encuentran en el norte en las comunas 2 y 3. Si se tiene en cuenta que según como haya más hospitales habrá más camas para heridos, se puede decir que solo las comunas anteriormente mencionadas cuentan con cierta capacidad para la atención en salud en caso de un desastre y las demás comunas de la ciudad no.

Con el objetivo de generar una herramienta visual que acompañe la matriz de los recursos de infraestructura del municipio de Cali, se presentan una serie de mapas de la ciudad con los puntos de interés marcados y la información de su capacidad sobre cada marcador en la aplicación.

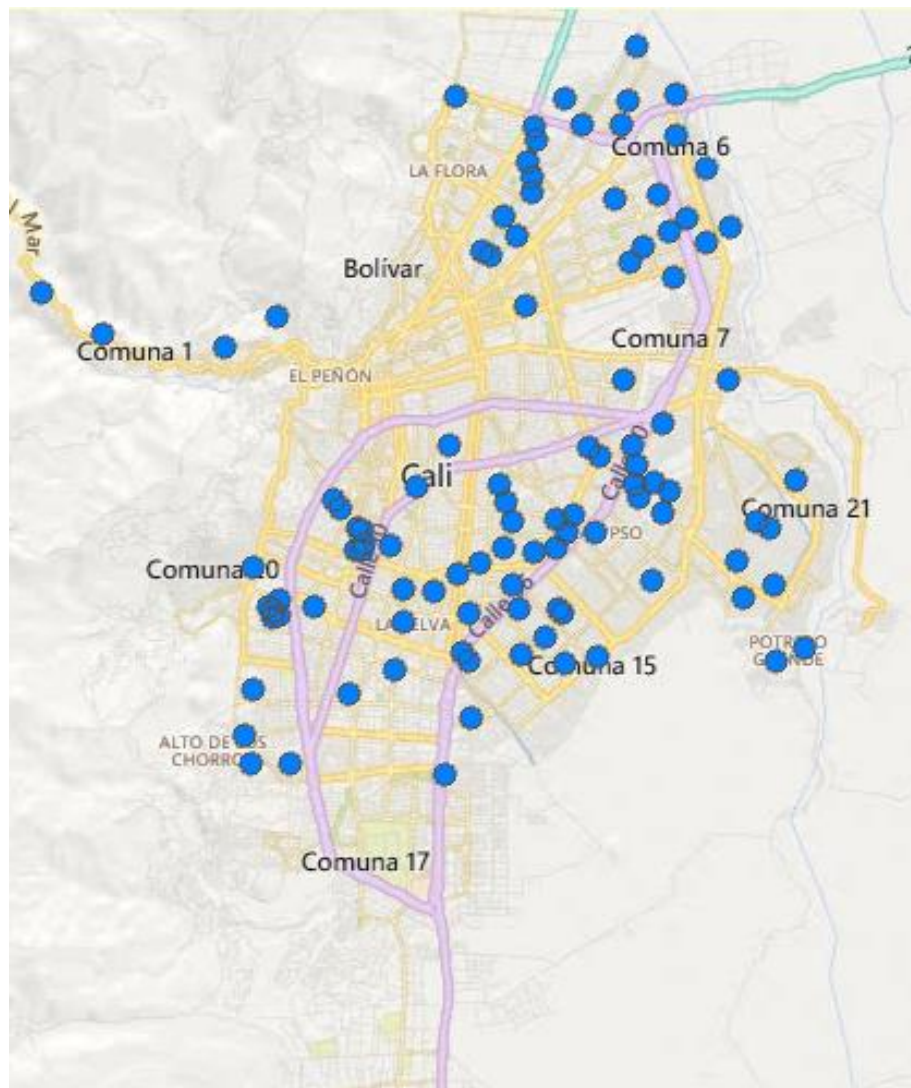


Figura 13: Mapa de la infraestructura de Cali para ser usada como Albergues o Bodegas. FUENTE: Elaboración propia

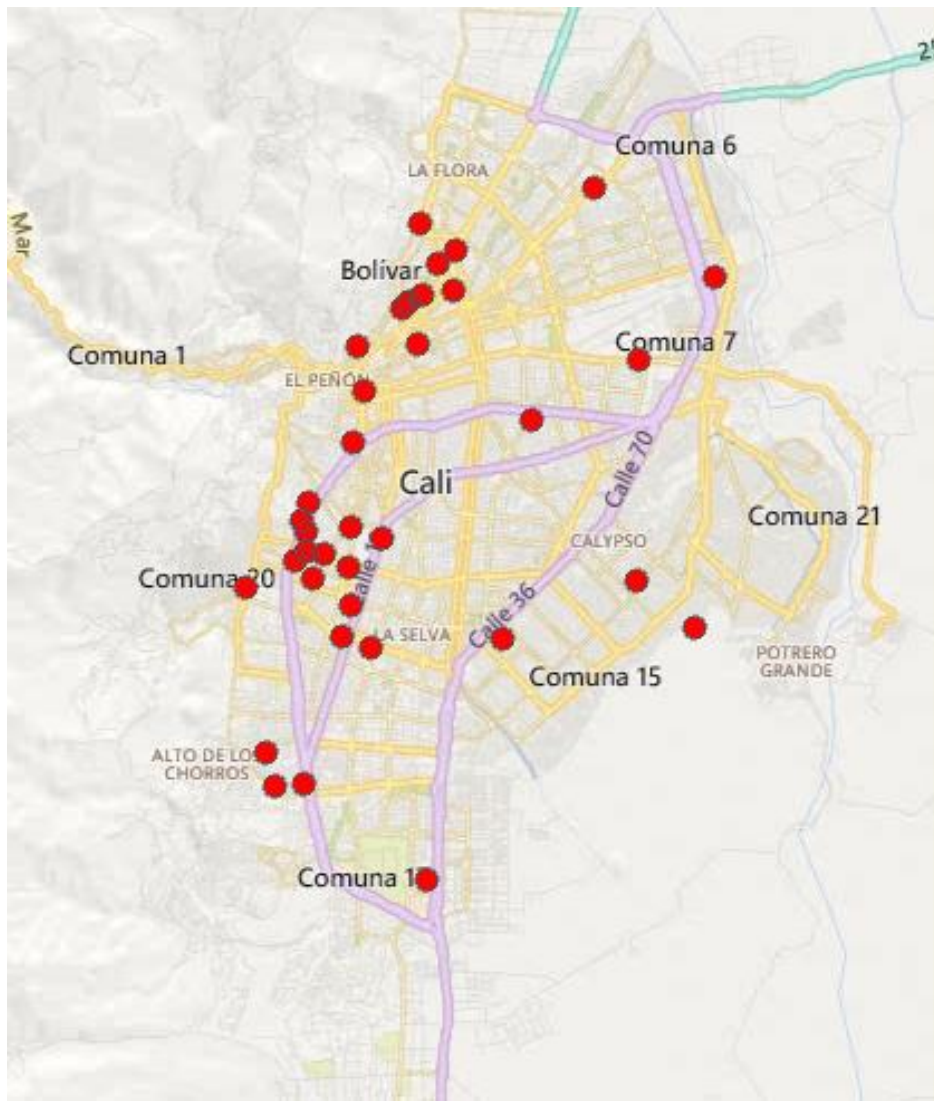


Figura 14 Mapa de la infraestructura de Cali para ser usada para la atención en salud. FUENTE: Elaboración propia

En las Figura 13, Figura 14 y Figura 15 se presentan imágenes de los mapas generados por la aplicación de Java Eclipse, al abrir el programa y pasar el cursor sobre cada marcador se presenta su información más relevante como su nombre, comuna, dirección y principalmente capacidad. En el Anexo 3. Aplicación con los mapas de la infraestructura de Cali se observa una vista completa de la pantalla de la ejecución del código.

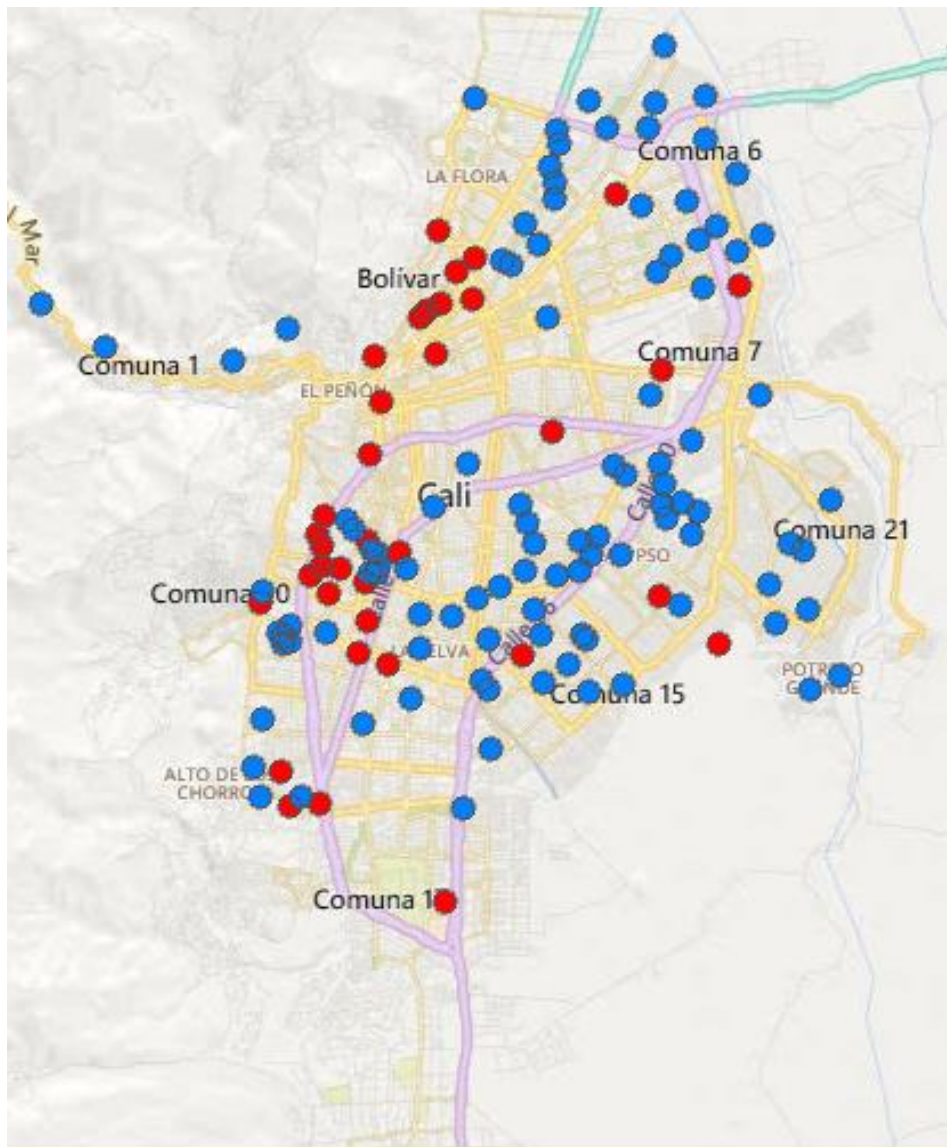


Figura 15: Mapa con toda la infraestructura identificada para la atención de un terremoto. FUENTE: Elaboración propia

5.2.2 Discusión

En el proceso de recolección de datos relevantes acerca de los recursos de infraestructura del municipio de Cali para determinar su capacidad, en términos de los edificios de educación, la información hallada fue parcial pues no se encontraban documentadas todas las instituciones educativas y al recurrir a los entes gubernamentales como la secretaría de educación, se recibió una respuesta restrictiva para acceder a los demás datos necesarios para el proyecto.

Si bien se comprende la ideología planteada en la Directiva Ministerial 12, donde se afirma que las instituciones educativas deben ser de los últimos recursos a considerarse en una situación de emergencia, levantar la información de la capacidad en estos espacios es una necesidad para que las entidades encargadas de las estrategias de prevención de desastres tengan un panorama completo de todo con lo que puede contar la ciudad y su capacidad a pesar de que ciertos recursos no sean los primeros en utilizarse, pues si se presenta una eventualidad de gran magnitud seguramente se deba disponer de todos los recursos que estén disponibles en el momento.

5.2.3 Conclusiones

Entendiendo que para dar respuesta a una situación de desastre los principales protagonistas son las personas que se ven afectadas por dicha eventualidad, analizando las capacidades de Albergues y Atención por Salud, las comunas 2, 17 y 19 son las que están mejor preparadas en cuanto a su capacidad, teniendo en cuenta que la suma de sus capacidades es de 66.058 personas alojadas y 4.411 camas, que son respectivamente el 32% y 79% del total de la capacidad en estos dos aspectos.

Al momento de analizar cuantas personas recibirían esta atención se debe tener en cuenta que la población de estas tres comunas es de 392.191 personas, donde se estarían entonces albergando al 17% y atendiendo por heridas al 1%. Así mismo, si se considera que los habitantes de estas tres comunas solo son el 16% de la población total del municipio (2'400.112), los recursos de la ciudad no son suficientes para atender a la población, especialmente en términos de salud ni siquiera son suficientes para cubrir a las tres comunas donde se encuentran concentrados.

En términos de espacio para ubicar kits de ayuda humanitaria, en principio se puede apreciar que la capacidad llega casi a nueve millones de unidades, por lo que aproximadamente hay 4 kits por cada habitante. Ahora considerando que la prioridad es salvaguardar las vidas de las personas, muy seguramente los escenarios deportivos destinarían casi toda su capacidad para el alojamiento de personas antes que, para usarse como bodegas, pero a pesar de esto es poco probable que haya problemas de capacidad para almacenar kits de ayuda humanitaria, es más importante que en futuros estudios se evalúe el abastecimiento de la ciudad en cuanto a estos recursos.

5.3 Objetivo 3: Proponer la forma en que se debe utilizar la infraestructura municipal disponible en Cali.

5.3.1 Resultados

Según las estimaciones realizadas con la Ecuación 7. Modelo de Regresión Lineal para la estimación de heridos del modelo de regresión lineal se obtuvo el número de heridos observado en la Tabla 8 donde se identificó que en las comunas 15, 21 y 1 se presentarían el mayor número de heridos después de un terremoto, mientras que en las comunas 16, 13 y 12 este valor sería casi nulo.

De acuerdo con el Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Cali (2019) la población de las comunas 15, 21 y 1, es de 171.556, 119.763 y 100.497 respectivamente; las cuales se encuentran entre los valores de población promedio para la ciudad. Por otra parte, las comunas 16, 13 y 12 cuentan con 111.198, 179.360 y 66.221 personas. Se puede apreciar entonces que la diferencia de población entre estos conjuntos de comunas no es demasiado grande, además de que para las comunas más afectadas el número de heridos con respecto a su población sería del 3%.

Si bien los números de personas heridas en estas tres comunas más afectadas no es muy grande con respecto a sus habitantes, si hay un aspecto importante que resaltar, las condiciones de dichos habitantes en estas comunas. En las comunas 15, 21 y 1 la gran mayoría de las viviendas pertenecen a los estratos 1 y 2, adicionalmente, de acuerdo con la

Tabla 6: Resumen de Capacidad para Kits de Ayuda Humanitaria, Albergados y Heridos por comuna. FUENTE: Elaboración propia, la capacidad de atención de heridos en estas comunas es también casi nula, pues solo hay un hospital en la comuna 15 con una capacidad de 41 camas y no hay ningún hospital en las otras dos comunas.

En contraste con lo anterior, en las comunas 16, 13 y 12 la mayoría de las viviendas están entre los estratos socioeconómicos 2 y 3, la capacidad de atención de heridos también es baja (

Tabla 6: Resumen de Capacidad para Kits de Ayuda Humanitaria, Albergados y Heridos por comuna. FUENTE: Elaboración propia) pero considerando que en los escenarios estudiados las necesidades también son bajas, esto no representaría un problema para los procesos de respuesta ante un terremoto, caso contrario al conjunto anterior de comunas.

Por otro lado, en relación con los damnificados que requerirían albergues y kits, la Tabla 9 muestra que la comuna 21 presentó la mayor demanda seguida por la 9 y la 1. En contraste, las comunas 16, 13 y 12 tuvieron el menor número de damnificados y kits requeridos (Ver Tabla 9). En las comunas 21, 9 y 1 se cuenta con 3, 2 y 4 escenarios deportivos respectivamente que podrían ser usados para estos propósitos; mientras que, en las comunas 16, 13 y 12 se tienen 8, 8 y 4 escenarios respectivamente. El

anterior hallazgo fue importante, pues se identificó que las comunas que tendrían menos necesidades, en los escenarios estudiados, justamente tienen más capacidad a su disposición en comparación con el conjunto de comunas que requerirían más atención. Adicionalmente, si se comparan específicamente las necesidades de albergue de las comunas más afectadas (21, 9 y 1) con sus respectivas capacidades para este propósito (

Tabla 6: Resumen de Capacidad para Kits de Ayuda Humanitaria, Albergados y Heridos por comuna. FUENTE: Elaboración propia), se puede observar que ninguna de estas comunas contaría con los recursos necesarios para suplir su demanda y por lo tanto necesitarían asignar a sus damnificados a edificios de otras comunas. Un punto a favor sería que la demanda completa de toda la ciudad para estos escenarios no superaría a la capacidad total de la ciudad (

Tabla 6: Resumen de Capacidad para Kits de Ayuda Humanitaria, Albergados y Heridos por comuna. FUENTE: Elaboración propia) tanto para albergues como para bodegas.

Tabla 8: Estimación de heridos. FUENTE: Elaboración propia

Comuna	Estimación de Heridos		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
1	2.549	1.524	1.486
2	588	316	307
3	582	313	303
4	585	316	307
5	541	288	278
6	506	266	259
7	582	313	303
8	563	300	291
9	598	322	313
10	538	288	275
11	1.901	1.126	1.094
12	190	73	69
13	19	-	-
14	626	341	329
15	5.744	3.498	3.394
16	-	-	-
17	582	316	300
18	531	284	272
19	585	316	303
20	1.088	626	607
21	3.710	2.239	2.179
22	617	335	319

Con la información de las tablas 8, 9 y los datos de capacidad de la matriz de recursos (Anexo 2. **Matriz de clasificación de los recursos de Cali con columnas de capacidad**) fue finalmente ejecutado el código que presenta la asignación de la infraestructura de Cali para los propósitos de atención en salud, albergue de personas damnificadas y bodega para kits de ayuda humanitaria. En el Anexo 4. Imagen de Resultados del Código del modelo para el escenario 1 se aprecian los resultados generados para el escenario 1 y el Anexo 5. Matriz con los resultados del modelo en el escenario 1 presenta la matriz donde fue recopilada la información de forma que se pudiera analizar con herramientas de Microsoft Excel. Como un libro aparte de Excel se pueden encontrar las matrices para los tres escenarios, que son finalmente propuestas de asignación de recursos en Cali para los escenarios de riesgo estudiados ([Matriz de Resultados](#)).

Tabla 9: Estimación de damnificados y kits. FUENTE: Elaboración propia

Comuna	Estimación de Damnificados			Estimación de Kits		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
1	14.861	10.510	10.314	14.861	10.510	10.314
2	6.387	4.517	4.433	6.387	4.517	4.433
3	6.704	4.742	4.653	6.704	4.742	4.653
4	7.292	5.157	5.059	7.292	5.157	5.059
5	4.499	3.183	3.123	4.499	3.183	3.123
6	4.462	3.159	3.097	4.462	3.159	3.097
7	7.915	5.601	5.492	7.915	5.601	5.492
8	5.943	4.206	4.126	5.943	4.206	4.126
9	17.303	12.240	12.012	17.303	12.240	12.012
10	5.216	3.688	3.620	5.216	3.688	3.620
11	11.867	8.397	8.240	11.867	8.397	8.240
12	4.249	3.008	2.951	4.249	3.008	2.951
13	3.474	2.456	2.411	3.474	2.456	2.411
14	11.744	8.305	8.150	11.744	8.305	8.150
15	8.144	5.762	5.653	8.144	5.762	5.653
16	3.396	2.403	2.358	3.396	2.403	2.358
17	6.242	4.415	4.334	6.242	4.415	4.334
18	5.538	3.915	3.843	5.538	3.915	3.843
19	6.485	4.589	4.502	6.485	4.589	4.502
20	10.962	7.756	7.609	10.962	7.756	7.609
21	36.289	25.671	25.189	36.289	25.671	25.189
22	8.946	6.330	6.213	8.946	6.330	6.213

En un primer momento, el modelo de asignación de recursos fue ejecutado y analizado sin tener en consideración la *Ecuación 6. Restricción de distribución de los recursos equitativamente entre las comunas* que contiene la restricción que asigna de forma equitativa la capacidad de la ciudad entre las comunas de acuerdo con sus necesidades. La Figura 16: Grafico de dispersión de los resultados del escenario 1 sin la restricción de equidad. FUENTE: Elaboración propia presenta la forma en que el modelo distribuiría la atención de los tres propósitos estudiados entre las comunas de la ciudad, sin tener en cuenta la última restricción. Es evidente que en este caso la comuna 15 recibiría toda la atención en salud solo por ser la más afectada en este aspecto y se dejarían de lado las necesidades que tendrían otras comunas.

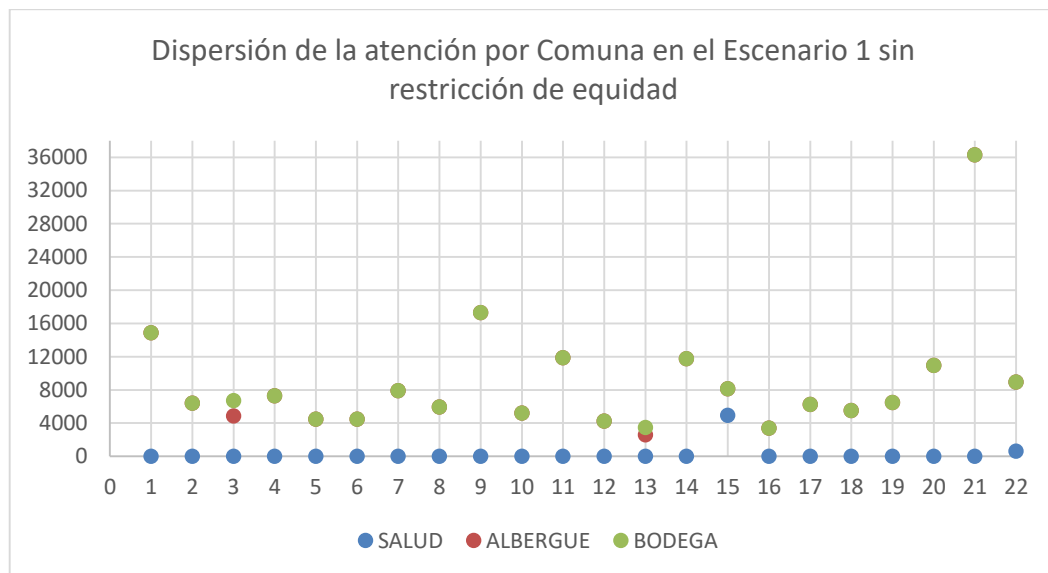


Figura 16: Grafico de dispersión de los resultados del escenario 1 sin la restricción de equidad. FUENTE: Elaboración propia

Es importante entonces contar con la restricción de la equidad en el modelo de asignación, para esto fue necesario en cada escenario experimentar con distintos valores de E (*Ecuación 6. Restricción de distribución de los recursos equitativamente entre las comunas*) para encontrar el mayor porcentaje posible antes de que el modelo dejara de ser factible. Se encontró que para el primer escenario la asignación debía ser de al menos el 23,8% de la demanda en todas las comunas, para el segundo de 41,4% y en el tercer escenario 42,7%. Según los escenarios evaluados, para el caso de albergue y bodega se encontró que la ciudad tiene la suficiente capacidad para responder a toda la demanda. Con lo anterior, se logró distribuir los recursos de salud en todas las comunas basados en los porcentajes anteriores (Ver Figura 17). Una vez completadas las restricciones y parámetros fueron ejecutados los modelos en cada escenario.

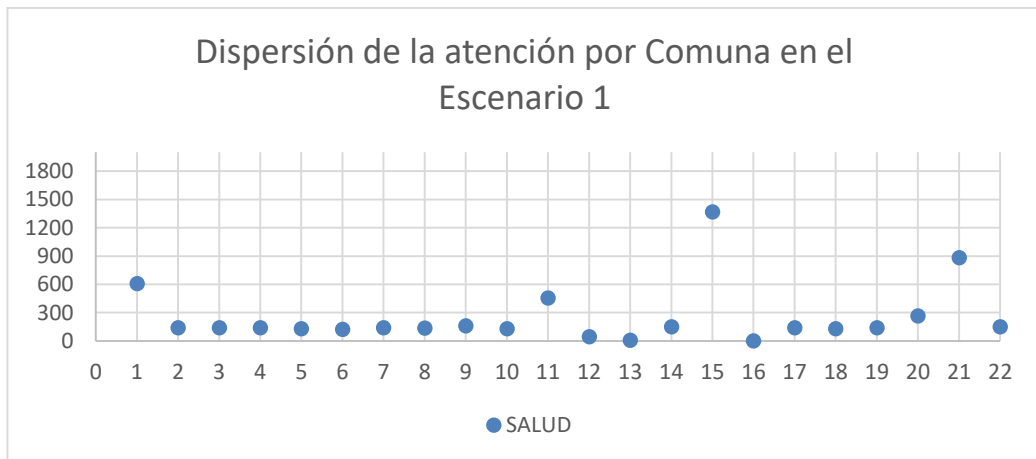


Figura 17: Grafico de dispersión de los resultados del escenario 1 para la atención en salud. FUENTE: Elaboración propia

Los resultados de la función objetivo (*Ecuación 1. Función Objetivo*) en cada escenario resultaron de sumar el nivel de atención de los tres propósitos, para el primer escenario la función objetivo tuvo un resultado de 401.359, en el caso del segundo escenario el resultado fue 285.543 y para el tercero 280.543. La distribución de este resultado entre los tres propósitos se puede observar en la Figura 18: Resumen de los resultados del modelo por propósito en cada escenario. FUENTE: Elaboración propia, donde se puede evidenciar que la atención de salud está muy por debajo de los otros dos propósitos, situación que se analizara más a profundidad más adelante.

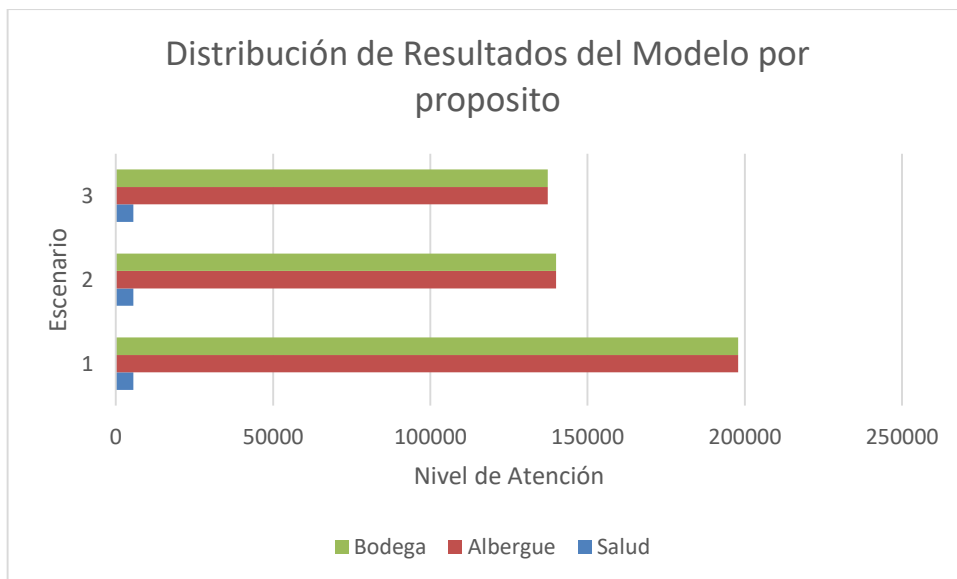


Figura 18: Resumen de los resultados del modelo por propósito en cada escenario. FUENTE: Elaboración propia

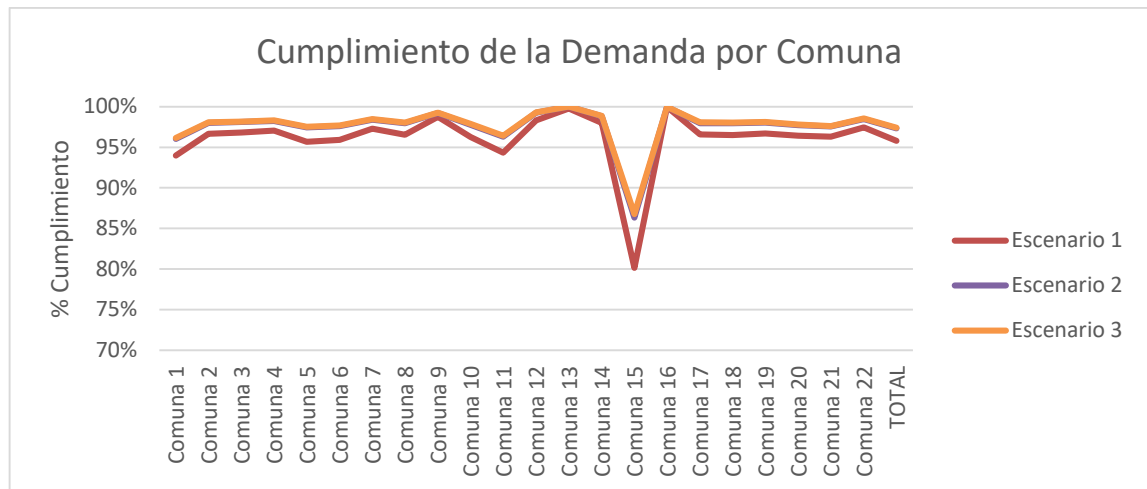


Figura 19: Grafico de cumplimiento de la demanda en los tres escenarios. FUENTE: Elaboración propia

Uno de los principales aspectos a resaltar de los resultados del modelo es el del cumplimiento de la demanda que se calculó para cada escenario, la Figura 19 se construyó con una serie de tres tablas comparativas con las cuales se pudieron evaluar las diferencias comuna por comuna en cada una de las alternativas de uso para la infraestructura de Cali. Las tablas antes mencionadas son los Anexo 6. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 1, Anexo 7. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 2 y Anexo 8. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 3.

En todos los escenarios se observó que la comuna 15 se destacó por su bajo índice de cumplimiento, con un valor de 80%, 86% y 87% para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. Lo anterior quiere decir en términos generales que para estos escenarios no podrían atenderse las cantidades requeridas de heridos, damnificados y almacenamiento. Pero el trasfondo de esta situación se explica de revisar las tablas comparativas que se encuentran en los anexos, pues ahí se puede ver que en términos de salud el cumplimiento siempre es muy bajo debido a la poca capacidad que tiene la ciudad en este aspecto. En la Figura 20: Grafico de índice de cumplimiento en salud para los tres escenarios. FUENTE: Elaboración propia se aprecia que en los tres casos el % de cumplimiento es inferior al 50%, más específicamente, si se aplica este cumplimiento a los datos de demanda de la Tabla 8, en el escenario 1 se atenderían *únicamente* 5.553 personas de las 23.221 que estarían heridas, en el escenario 2 se atenderían 5.553 de 13.401 y para el tercero 5.553 de 12.989. En los últimos dos casos (escenarios) más de 7000 personas no serían atendidas y en el escenario 1 más de 17.000. Una situación como la estudiada en este documento muy posiblemente tendría un número considerable de decesos de heridos que no recibirían la atención médica necesaria, en el caso hipotético de que la ciudad no contara con más que sus recursos municipales.

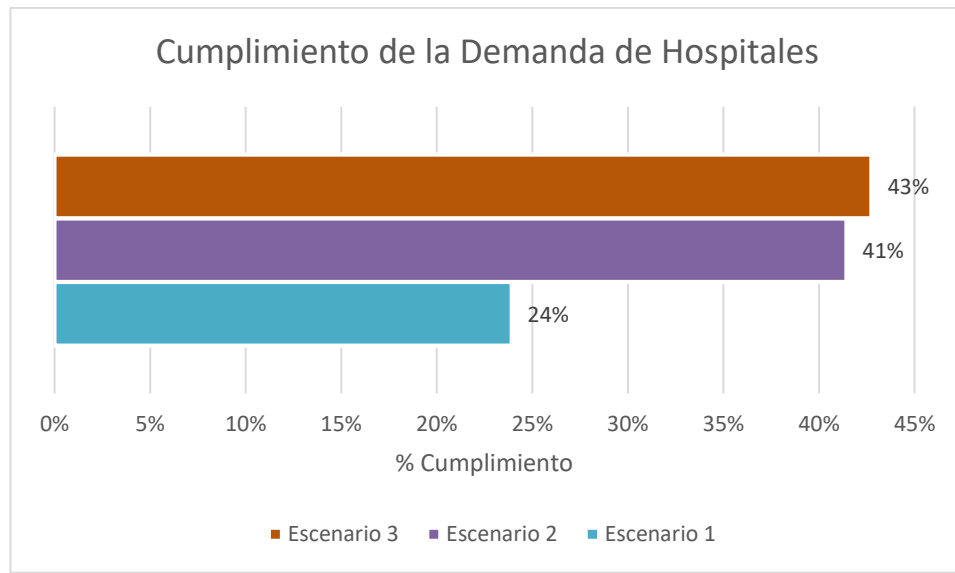


Figura 20: Grafico de índice de cumplimiento en salud para los tres escenarios. FUENTE: Elaboración propia

5.3.2 Discusión

Los resultados que se obtuvieron de las estimaciones de demanda (Tabla 8: Estimación de heridos. FUENTE: Elaboración propia y Tabla 9: Estimación de damnificados y kits. FUENTE: Elaboración propia) dejan en evidencia los posibles problemas que tendría la ciudad a la hora de responder ante un terremoto con las características de los tres escenarios estudiados. En primer lugar, en las comunas que tendrían las mayores necesidades en salud (15, 21 y 1) residen las personas más vulnerables de la ciudad (estrato 1 y 2), adicionalmente son de las comunas con la menor capacidad para la atención en salud. Esto quiere decir que en una situación de emergencia los afectados tendrían que ser transportados hasta comunas que, si cuentan con capacidad, lo que traería consigo un posible incremento en el número de heridos que puedan resultar muertos ya sea por la no disponibilidad de los recursos de transporte, demoras en el traslado, o por limitaciones en la capacidad en los hospitales a los que sean trasladados.

En segundo lugar, en las comunas con mayores necesidades de albergue en la ciudad (21, 9 y 1) igualmente residen personas de estratos socioeconómicos bajos y no hay suficiente capacidad para los damnificados de dichas comunas, por lo que nuevamente hay una situación logística importante de transporte hasta otras comunas, sin mencionar los conflictos sociales que se den entre las personas de estas comunas en búsqueda de tener un espacio en los refugios para sus familias.

Por último, a lo largo de la ciudad se podrían presentar actos de vandalismo para saquear los kits de ayuda humanitaria, especialmente porque quienes más los necesitan (comunas 21, 9 y 1) son personas en condiciones de vulnerabilidad que no podrían costear alimentos, implementos de aseo, medicina, entre otros. Lo anterior, está relacionado con el hecho de que este estudio presenta la capacidad de las bodegas y como deberían asignarse los kits, sin embargo, la disponibilidad de estos por parte del gobierno, el tiempo que les tomaría abastecer las bodegas y demás procesos de abastecimiento no han sido estudiados y también tendrían un impacto alto en un proceso de asignación de recursos equitativo.

Por otra parte, el modelo de asignación deja en evidencia que el sector salud (Figura 20: Grafico de índice de cumplimiento en salud para los tres escenarios. FUENTE: Elaboración propia) presentaría los mayores problemas para atender a los heridos de la ciudad, a pesar de que se asignen equitativamente las camas disponibles entre las comunas, seguiría habiendo un déficit de más de 17.000 personas que no recibirían atención (en el escenario 1), esto sin considerar que los mismos hospitales de la ciudad pueden ser destruidos a causa del sismo. Una problemática de tal magnitud debe invitar a las autoridades a diseñar una estrategia para la instalación de suficientes carpas de atención en salud para suplir la demanda tan alta que tendría Cali, desarrollar estrategias para trasladar, de manera eficaz y eficiente, a los heridos hasta los hospitales de otras ciudades principales e igualmente traer el personal y equipos necesarios en salud para dar respuesta a una emergencia causada por un terremoto.

5.3.3 Conclusiones

El modelo de asignación presenta un primer panorama de los puntos a tener en consideración para distribuir los recursos de infraestructura de la ciudad, pero en la práctica aun harían falta considerar otras variables como la distancia entre las comunas, la disponibilidad de medios de transporte y si los edificios estudiados quedarían en pie. Lo anterior, con el objetivo de mejorar el servicio de mitigación prestado a la comunidad local.

En el modelo matemático no se consideraron las distancias de desplazamiento entre lugares, lo cual sería un punto importante en la logística humanitaria. Además, se asumió que los edificios considerados en el modelo no fueron afectados por el terremoto y pueden ser usados. De igual forma, este modelo solo contempló la posibilidad de usar un edificio para un solo propósito, mientras que, en la práctica, viéndolo desde el panorama de los escenarios deportivos, se asignarían tanto personas como kits de ayuda humanitaria en un mismo complejo.

Bajo los escenarios estudiados y con los recursos caracterizados, se puede decir que la ciudad no se encuentra preparada para atender las consecuencias de un terremoto en términos del servicio de salud que requerirían los heridos estimados. Por lo tanto, es necesaria la intervención del gobierno departamental y nacional,

para lograr mitigar los impactos de una situación de desastre del tipo analizado en este estudio.

Además, la equidad es un factor que se vuelve más difícil de garantizar para el gobierno local en la medida en que se incrementa el número de personas que requieren apoyo en el proceso de mitigación, ya sea en salud, albergue o kits.

Si bien el modelo estudiado presenta ciertas limitaciones para la realización del estudio de asignación de infraestructura del municipio de Cali, aun así presenta un correcto panorama de las falencias en el sistema de salud que puede tener la ciudad en el momento de enfrentarse con una situación de desastre, además de presentar propuestas de asignación que siempre buscan maximizar el nivel de atención en Cali, cumpliendo en la mayoría de los casos con las demandas estimadas y respetando la capacidad que tiene cada edificio.

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones Generales

Según la investigación realizada, los entes gubernamentales de la ciudad no tienen una caracterización clara de los recursos de infraestructura con los que cuenta o podría contar la ciudad para atender las consecuencias de un terremoto. Lo anterior, genera que el proceso de Respuesta ante un desastre se haga de manera reactiva y no anticipativa. Por lo tanto, el listado de caracterización elaborado en este proyecto es de gran utilidad para los organismos encargados de la gestión del riesgo en la ciudad.

En cuanto a la capacidad de la infraestructura de la ciudad se encontró que, de acuerdo con los resultados de la investigación realizada, en Cali no existe una distribución equitativa geográficamente de los recursos de infraestructura y a su vez la capacidad de atención de las instituciones de salud es bastante baja. La mayoría de los hospitales se encuentran concentrados en el norte y sur de la ciudad, en las comunas 2 y 19, donde están ubicadas viviendas de estratos socioeconómicos altos (4 y 5). Una situación muy similar se presenta con los

escenarios deportivos municipales que pueden servir de albergue o bodega, pues estos también se encuentran concentrados en zonas de la ciudad diferentes del oriente de Cali, donde en su mayoría residen personas en condiciones vulnerables (estrato 0, 1 y 2). Lo anterior, puede generar problemas logísticos complejos en el transporte y la velocidad de respuesta de las autoridades ante estas situaciones.

En términos generales, de los resultados del modelo matemático de este proyecto se obtuvo que, si la ciudad llegara a sufrir un terremoto de magnitud 6,9 en la escala de Richter, en el tema de atención en salud se alcanzaría una capacidad de atención del 23%, 41% y 42% para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente, lo cual es un bajo indicador que puede significar un número considerable de muertes debido a la falta de recursos de salud. Por otro lado, en relación con albergues y capacidad de almacenamiento de kits en bodegas la atención siempre está por encima del 95%, lo cual es un buen indicador de la atención en vivienda que podría tener la ciudad en caso de un terremoto.

6.2 Limitaciones y Recomendaciones

Este proyecto se limita expresamente a caracterizar los recursos de infraestructura del municipio para atender las consecuencias de un terremoto, dando una asignación que no involucra todas las posibles variables que se pueden derivar de una situación de estas como lo son la probabilidad de que una edificación siga en pie después de un terremoto lo cual disminuye los cálculos de capacidad, las distancias entre edificios, los servicios habilitados, la gravedad de los heridos y así mismo el nivel de atención que estos podrían requerir, la disponibilidad de capital humano para la evacuación, entre otros.

Otras de las grandes limitaciones para el desarrollo de este proyecto están relacionadas con la falta de información por parte de los entes encargados de la gestión del riesgo en temas de la infraestructura con la que contaría el municipio para dar respuesta a las consecuencias de un terremoto, ya que en temas de albergues y bodegas no hay claridad de qué edificios serían utilizados y finalmente solo fueron validados los escenarios deportivos. Con relación a lo anterior se encontró que algunos espacios tienen limitaciones legislativas para poder ser utilizados en una situación de desastre, como es el caso de las instituciones educativas.

Para los cálculos y estimaciones del proyecto se tuvieron en cuenta supuestos que podrían validarse si se tuviera más información, el primero fue para el cálculo de la capacidad de los escenarios deportivos donde no fue posible contar con el área real de cada edificio y se toma una medida con ayuda de Google Earth. En segundo lugar, el modelo de regresión que se utilizó para la estimación de los heridos paso las pruebas de homocedasticidad e independencia, pero no la prueba de normalidad de los residuos. Por último, para el modelo matemático se determinó que un escenario deportivo podría servir para un único propósito a la vez, albergue o bodega, lo cual es distinto a como se realizaría en la realidad.

Por otro lado, se recomienda a la Alcaldía Municipal de Santiago de Cali realizar propuestas puntuales en lo que respecta a los planes de respuesta frente a desastres. Lo anterior, dado que después de revisar el PLEC se identifican vacíos en lo referente a la identificación de recursos físicos disponibles en la ciudad, sus usos, su capacidad y el plan de acción específico que se podría seguir.

Para futuros proyectos, se recomienda explorar en el modelo de asignación distintas variables y parámetros como las distancias entre edificios, los recursos de transporte, rutas disponibles, número de muertos y la capacidad necesaria para almacenar cadáveres, trasladarlos y cremarlos. Además, se podría estimar los insumos requeridos para el funcionamiento de los recursos caracterizados en el presente trabajo. Con esto, se podrá contar con un modelo más preciso y cercano a la realidad sobre la atención de desastres causados por un terremoto en el municipio de Cali.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Municipal de Santiago de Cali. (2014). *Caracterización socio-economica de los barrios de Santiago de Cali*. Secretaría de Desarrollo Territorial y Bienestar Social. <https://www.cali.gov.co/documentos/1582/estadisticas-por-barrio/>
- Alcaldía Municipal de Santiago de Cali. (2017). *Instituciones Educativas Oficiales de Santiago de Cali*. <https://www.datos.gov.co/Educaci-n/Instituciones-Educativas-Oficiales-de-Santiago-de-/g6dk-zznj>
- Altay, N. (2013). Capability-based resource allocation for effective disaster response. *IMA Journal of Management Mathematics*, 24(2), 253–266. <https://doi.org/10.1093/imaman/dps001>
- Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175(1), 475–493. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.016>
- Ávila-Toscano, J., Vivas, O., Jiménez, M., Rapalino, O., Herrera, A., Salinas, N., Mendoza, E., Portillo, A., & Cuadro, D. (2016). Gestión Del Riesgo De Desastres En Colombia. *Banco Mundial*, 438. <http://documents.worldbank.org/curated/pt/671321468026993367/pdf/701030ESW0P1290ESTIONODELORIESGOweb.pdf>
- Cardenas, M. A., & Manrique, J. S. (2019). *Modelo matemático para el diseño de redes de logística humanitaria en la ciudad de Cali*. Universidad Icesi.
- Carlos Manuel Olarte Martinez. (2018). ESTRATEGIA DE RESPUESTA A EMERGENCIAS DE SANTIAGO DE CALI. In *Alcaldía de Santiago de Cali*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Cobo Lloreda, R. H., Hernandez Bohmer, F. J., & Perea, F. A. (2000). *PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Documento Resumen*.
- Cruz Roja Colombiana. (2008). *Manual Nacional para el manejo de Albergues Temporales*. http://www.cruzrojacolombiana.org/sites/default/files/manual_albergues_temporales.pdf
- Denizel, M., Usdiken, B., & Tuncalp, D. (2003). Drift or shift? Continuity, change, and international variation in knowledge production in OR/MS. *Operations Research*, 51(5), 711–720+836. <https://doi.org/10.1287/opre.51.5.711.16750>
- Departamento Administrativo de Planeación Municipal. (2018). *Estratificación socioeconómica urbana por comunas en Cali*. <http://datos.cali.gov.co/dataset/estratificacion-socioeconomica-urbana-por-comunas-en-cali-ano-2015>

- Departamento Administrativo de Planeación Municipal. (2019). *Proyecciones de población de Cali por comuna y corregimiento 2006-2020*. <http://datos.cali.gov.co/is/dataset/proyecciones-de-poblacion-de-cali-por-comuna-y-corregimiento-2006-2020>
- Departamento Administrativo de Planeación Municipal. (2019). *Cali en cifras 2018 - 2019*. <https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/138164/cali-en-cifras/>
- Esposito Amideo, A., Scaparra, M. P., & Kotiadis, K. (2019). Optimising shelter location and evacuation routing operations: The critical issues. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 279, Issue 2, pp. 279–295). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.009>
- FEMA. (2006). Resource Typing System. *Homeland Security Digital Library*, 1–7. <https://www.hsdl.org/?view&did=778675>
- Galindo, G., & Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230(2), 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.039>
- Gaytán Iniestra, J., Arroyo López, P. E., & Colón, R. E. (2012). A BI-CRITERIA MODEL TO LOCATE SHELTERS AS PART OF AN EVACUATION PLAN IN THE CASE OF FLOODS. *Revista Ingeniería Industrial*, 2, 35–56.
- Lamos, H., Aguilar, K., & Acosta, R. J. (2019). OR/MS research perspectives in disaster operations management: A literature review. *Revista Facultad de Ingeniería*, 91, 43–59. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n91a05>
- Lind, D. A., Marchal, W. G., & Wathen, S. A. (2014). Estadística Aplicada A Los Negocios Y La Economía. In *Ciencia y Sociedad: Vol. XVI* (Decimoquin, Issue 4). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.22206/cys.2011.v36i4.pp590-627>
- Mejía, M. (2012). *Modelo de optimización y metaheurístico integral del problema de Logística Humanitaria a través de un enfoque multicriterios: Caso de estudio en Villahermosa*. Disertación doctoral, Tecnológico de Monterrey, Toluca, México.
- MINISTERIO DE SALUD. (2016). *PROGRAMA NACIONAL DE PREPARATIVOS PARA ATENCION DE EMERGENCIAS Y DESASTRES*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/18988/1571.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mjelde, K. M. (1983). *Methods of the Allocation of Limited Resources* (Jhon Wiley & Sons (ed.)).
- Nievas, C. I., Bommer, J. J., Crowley, H., & van Elk, J. (2019). Global occurrence and impact of small-to-medium magnitude earthquakes: a statistical analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 35. <https://doi.org/10.1007/s10518-019->

00718-w

- O'Malley, R. T., & Modal, D. (2019). *METHOD AND SYSTEM FOR FORECASTING EARTHQUAKES AND GENERATING EARTHQUAKE ALERTS*.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edspap&AN=edspap.20190033476&site=eds-live>
- Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano. (2018). *Gestión Del Riesgo De Desastres*. In *Alcaldía de Santiago de Cali*.
- Okulewicz, S. C. (2019). Earthquake hazards. In *Salem Press Encyclopedia of Science*.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=88806718&site=eds-live>
- OPS. (2010). *Planificación y preparación de los albergues*.
https://www.paho.org/col/index.php?option=com_docman&view=download&alias=763-albergue-temporal&category_slug=temporada-invernal&Itemid=688
- Pablo Marín Arias, J., de Jesús Salcedo Hurtado, E., & Castillo González, H. (2008). *RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE PARÁMETROS INSTRUMENTALES Y MACROSÍSMICOS DE ALGUNOS TERREMOTOS FUERTES DE COLOMBIA EMPIRICAL RELATIONS BETWEEN INSTRUMENTAL PARAMETERS AND MACROSEISMIC OF SOME STRONG EARTHQUAKES OF COLOMBIA* (Vol. 30).
- Quiceno, Y. M., & Villegas, J. S. (2018). *Estimación de los impactos sociales y económicos de un terremoto usando regresión lineal múltiple*. Universidad Icesi. http://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/handle/10906/83972
- Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la Lengua Española*. Diccionario de La Lengua Española 23° Edición. <https://dle.rae.es/>
- Secretaría de Deporte y Recreación. (2016). *Directorio de Unidades Recreativas y Polideportivos Públicos de Santiago de Cali*.
http://web1.cali.gov.co/deportes/publicaciones/directorio_de_unidades_recreativas_y_polideportivos_de_santiago_de_cali_pub
- Tarela Alonso, E. (2012). *Un Nuevo enfoque de los precursores sísmicos: monitorización de la interacción frágil-dúctil de la litosfera y su relación con grandes terremotos*. <http://hdl.handle.net/10803/85546>
- Tufekci, S., & Wallace, W. A. (1998). The Emerging Area Of Emergency Management And Engineering. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 45(2), 103–105. <https://doi.org/10.1109/TEM.1998.669742>
- UNGRD. (2009). *Guía Municipal para la Gestión del Riesgo*. 150.

UNGRD. (2013a). *Estandarización de Ayuda Humanitaria de Colombia*
Estandarización de Ayuda.
http://www.gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/Ayuda_Humanitaria_Colombia.pdf

UNGRD. (2013b). *Manual de Logística para la Atención de Emergencias Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.*

Velez, C. M. (2009). *Directiva Ministerial No. 12* (p. 4).

Winston, W. (2004). *Investigación de Operaciones, aplicaciones y algoritmos* (Thomson Learning (ed.); 4th ed.).

ANEXOS

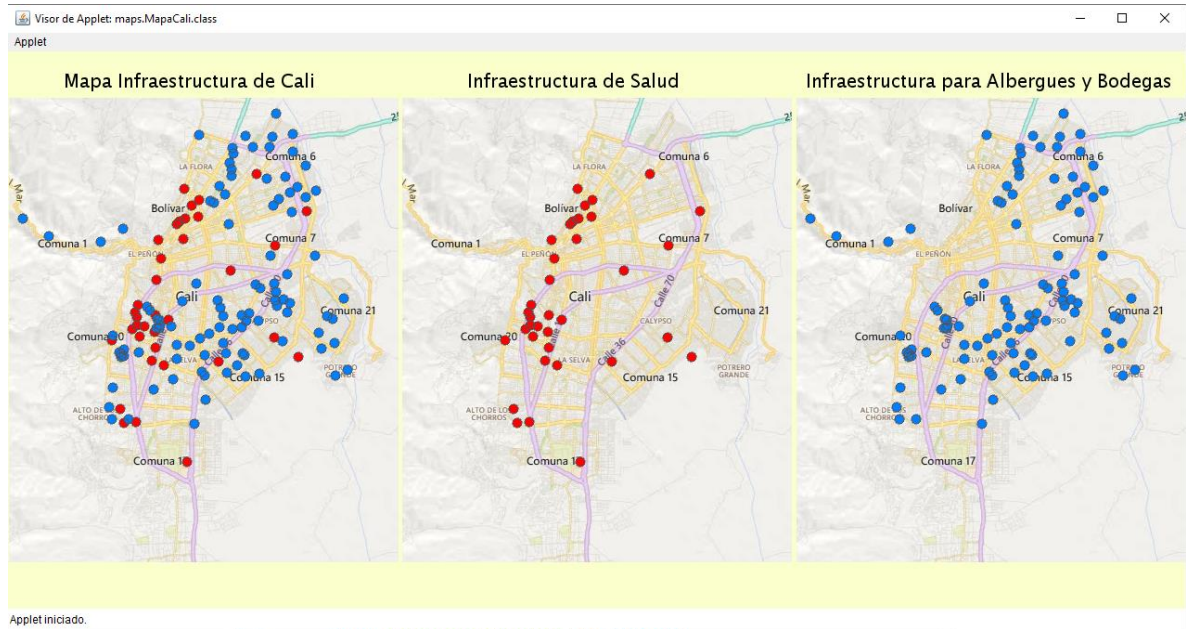
Anexo 1. Matriz validada de clasificación de los recursos de Cali

Nombre	Tipo	Clasificación			Localización		
		Albergue	Atención en Salud	Bodega	Dirección	Comuna	Coordenadas
CANCHA MÚLTIPLE VILLA DEL MAR	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV 8 OESTE N° 30 C-40	1	3.455865, -76.577545
CENTRO CULTURAL VISTA HERMOSA	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV 5 OESTE N° 44 - 69	1	3.462462, -76.587433
PARQUE LA MUTIS	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV 6 OESTE, ENTRE CL 17 y 18	1	3.453952, -76.558387
POLIDEPORTIVO BAJO AGUACATAL	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV 15 OESTE CON CL 10	1	3.458629, -76.550288
POLIDEPORTIVO BRISAS DE LOS ALAMOS	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV. 282 N° 73 N BIS - 00	2	3.493095, -76.504937
PARQUE EL AVIÓN	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV 2N N° 52AN - 44	2	3.469154, -76.518027
UNIDAD PACARÁ	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	Avenida 2N # 35A-04	2	3.483270, -76.510893
UNIDAD RINCON PACARÁ	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV 2GN N° 58N - 100	2	3.486675, -76.509479
PATINODROMO CIUDAD ALAMOS	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV 2IN CON CALLE 61AN	2	3.488603, -76.509768
CANCHA LA MERCED	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	AV 2A CL 50N	2	3.480806, -76.509996
PARQUE DEL AMOR	ESCENARIO DEPORTIVO	X		X	CLL 70 5N-21	2	3.493474, -76.521930
Dime Centro Médico Especializado	HOSPITAL		X		Avenida 5 Norte #20N-75	2	3.461450, -76.529145
Clinica de Occidente	HOSPITAL		X		CALLE 18 N #5-34	2	3.460411, -76.530440
Clinica Rafael Uribe Uribe	HOSPITAL		X		AV 3 BIS NTE #24-150	2	3.467209, -76.524882
Clinica Cristo Rey	HOSPITAL		X		Av. 4 Nte. #22N-46	2	3.462600, -76.527132
CLINICA ESIMED CALI NORTE	HOSPITAL		X		AV 3 N #32AN-40	2	3.469453, -76.521934
CLINICA SEBASTIAN DE BELALCAZAR COLSANITAS	HOSPITAL		X		AV 4 N #7N-81	2	3.454567, -76.537236
CLINICA SURA CHIPICHAPE	HOSPITAL		X		AV 6 BIS #35N-64	2	3.473659, -76.527441

Anexo 2. Matriz de clasificación de los recursos de Cali con columnas de capacidad

Nombre	Capacidad			
	Medida	Unidad	Medida 2	Unidad 2
CANCHA MÚLTIPLE VILLA DEL MAR	510	Personas	22563	Unidades
CENTRO CULTURAL VISTA HERMOSA	897	Personas	39671	Unidades
PARQUE LA MUTIS	382	Personas	16906	Unidades
POLIDEPORTIVO BAJO AGUACATAL	272	Personas	12032	Unidades
POLIDEPORTIVO BRISAS DE LOS ALAMOS	838	Personas	37045	Unidades
PARQUE EL AVIÓN	3553	Personas	157045	Unidades
UNIDAD PACARÁ	1136	Personas	50202	Unidades
UNIDAD RINCON PACARÁ	1570	Personas	69419	Unidades
PATINODROMO CIUDAD ALAMOS	3309	Personas	146237	Unidades
CANCHA LA MERCED	1543	Personas	68207	Unidades
PARQUE DEL AMOR	11004	Personas	486287	Unidades
Dime Centro Médico Especializado	53	Camas	No Aplica	No Aplica
Clinica de Occidente	237	Camas	No Aplica	No Aplica
Clinica Rafael Uribe Uribe	100	Camas	No Aplica	No Aplica

Anexo 3. Aplicación con los mapas de la infraestructura de Cali



Anexo 4. Imagen de Resultados del Código del modelo para el escenario 1

```

MainModelos.java    Modelos.java    Console
87            IloNumVar[][] y = new IloNumVar[n][m];
88
89
90            IloLinearNumExpr[][] capacidad = new IloLinearNumExpr[n][m];
91            IloLinearNumExpr[] unico = new IloLinearNumExpr[n];
92            IloLinearNumExpr[][] demanda = new IloLinearNumExpr[m][c];
93            IloLinearNumExpr[] usoCapacidad = new IloLinearNumExpr[c];
94
95            for (int k = 0; k < c; k++) {
96                for (int i = 0; i < n; i++) {
97                    for (int j = 0; j < m; j++) {
98                        x[i][j][k]=modeloK.intVar(0, Integer.MAX_VALUE);
99                        y[i][j]=modeloK.intVar(0, 1);
100                    }
101                }
102            }
103
104
105
106
107            // RESTRICCIONES
108
109            // DEMANDA
110
111            for (int j = 0; j < m; j++) {
112                for (int k = 0; k < c; k++) {
113                    demanda[j][k]=modeloK.linearNumExpr();
114                    for (int i = 0; i < n; i++) {
115                        demanda[j][k].addTerm(x[i][j][k], 1);
116                    }
117                    modeloK.addLe(demanda[j][k],A[j][k]);
118                }
119            }
120
121            // UNICO USO POR EDIFICIO
122            for (int i = 0; i < n; i++) {
123                unico[i]=modeloK.linearNumExpr();
124                for (int j = 0; j < m; j++) {
125                    unico[i].addTerm(y[i][j], 1);

```

```

<terminated> MainModelos [Java Application] C:\Program Files\Java\jre1.8.0_
Implied bound cuts applied: 24
Flow cuts applied: 2
Gomory fractional cuts applied: 3

Root node processing (before b&c):
  Real time            = 0.20 sec. (177.88 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time            = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.

Total (root+branch&cut) = 0.20 sec. (177.88 ticks)
Función Objetivo: 401359.0
x[1,1,0] =1.0
x[2,1,0] =382.0
x[10,1,0] =2446.0
x[25,2,0] =14861.0
x[41,1,0] =226.0
x[51,1,0] =275.0
x[67,1,0] =739.0
x[69,1,0] =1037.0
x[71,1,0] =691.0
x[78,1,0] =1802.0
x[85,1,0] =2514.0
x[88,1,0] =320.0
x[89,1,0] =4428.0
x[25,2,1] =6387.0
x[55,1,1] =2419.0
x[66,1,1] =161.0
x[74,1,1] =2380.0
x[112,1,1] =1419.0
x[60,1,2] =1345.0
x[81,1,2] =1842.0
x[83,1,2] =356.0
x[84,1,2] =411.0
x[95,2,2] =6704.0
x[99,1,2] =228.0
x[112,1,2] =1632.0

```


Anexo 6. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 1

ESCENARIO 1	SALUD		ALBERGUE		BODEGA	
	Resultados	Demanda	Resultados	Demanda	Resultados	Demanda
Comuna 1	607	2,549	14,861	14,861	14,861	14,861
Comuna 2	140	588	6,387	6,387	6,387	6,387
Comuna 3	139	582	6,704	6,704	6,704	6,704
Comuna 4	139	585	7,291	7,292	7,291	7,292
Comuna 5	129	541	4,498	4,499	4,498	4,499
Comuna 6	121	506	4,462	4,462	4,462	4,462
Comuna 7	139	582	7,914	7,915	7,914	7,915
Comuna 8	134	563	5,943	5,943	5,943	5,943
Comuna 9	158	598	17,302	17,303	17,302	17,303
Comuna 10	128	538	5,215	5,216	5,215	5,216
Comuna 11	453	1,901	11,867	11,867	11,867	11,867
Comuna 12	45	190	4,248	4,249	4,248	4,249
Comuna 13	5	19	3,473	3,474	3,473	3,474
Comuna 14	149	626	11,743	11,744	11,743	11,744
Comuna 15	1,367	5,744	8,143	8,144	8,143	8,144
Comuna 16	-	-	3,395	3,396	3,395	3,396
Comuna 17	139	582	6,241	6,242	6,241	6,242
Comuna 18	127	531	5,538	5,538	5,538	5,538
Comuna 19	139	585	6,484	6,485	6,484	6,485
Comuna 20	265	1,088	10,961	10,962	10,961	10,962
Comuna 21	883	3,710	36,288	36,289	36,288	36,289
Comuna 22	147	617	8,945	8,946	8,945	8,946
TOTAL	5,553	23,221	197,903	197,915	197,903	197,915

Anexo 7. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 2

ESCENARIO 2	SALUD		ALBERGUE		BODEGA	
	Resultados	Demanda	Resultados	Demanda	Resultados	Demanda
Comuna 1	631	1,524	10,510	10,510	10,510	10,510
Comuna 2	131	316	4,516	4,517	4,516	4,517
Comuna 3	130	313	4,741	4,742	4,741	4,742
Comuna 4	131	316	5,157	5,157	5,157	5,157
Comuna 5	119	288	3,182	3,183	3,182	3,183
Comuna 6	110	266	3,159	3,159	3,159	3,159
Comuna 7	130	313	5,600	5,601	5,600	5,601
Comuna 8	125	300	4,205	4,206	4,205	4,206
Comuna 9	134	322	12,239	12,240	12,239	12,240
Comuna 10	119	288	3,687	3,688	3,687	3,688
Comuna 11	466	1,126	8,396	8,397	8,396	8,397
Comuna 12	30	73	3,007	3,008	3,007	3,008
Comuna 13	-	-	2,456	2,456	2,456	2,456
Comuna 14	142	341	8,304	8,305	8,304	8,305
Comuna 15	1,448	3,498	5,761	5,762	5,761	5,762
Comuna 16	-	-	2,402	2,403	2,402	2,403
Comuna 17	131	316	4,415	4,415	4,415	4,415
Comuna 18	119	284	3,915	3,915	3,915	3,915
Comuna 19	131	316	4,588	4,589	4,588	4,589
Comuna 20	260	626	7,755	7,756	7,755	7,756
Comuna 21	927	2,239	25,671	25,671	25,671	25,671
Comuna 22	139	335	6,329	6,330	6,329	6,330
TOTAL	5,553	13,401	139,995	140,009	139,995	140,009

Anexo 8. Tabla comparativa de resultados vs la demanda del escenario 3

ESCENARIO 3	SALUD		ALBERGUE		BODEGA	
	Comuna	Resultados	Demanda	Resultados	Demanda	Resultados
Comuna 1	635	1,486	10,314	10,314	10,314	10,314
Comuna 2	131	307	4,432	4,433	4,432	4,433
Comuna 3	130	303	4,652	4,653	4,652	4,653
Comuna 4	131	307	5,059	5,059	5,059	5,059
Comuna 5	119	278	3,122	3,123	3,122	3,123
Comuna 6	111	259	3,097	3,097	3,097	3,097
Comuna 7	130	303	5,492	5,492	5,492	5,492
Comuna 8	124	291	4,126	4,126	4,126	4,126
Comuna 9	134	313	12,011	12,012	12,011	12,012
Comuna 10	117	275	3,620	3,620	3,620	3,620
Comuna 11	468	1,094	8,239	8,240	8,239	8,240
Comuna 12	30	69	2,950	2,951	2,950	2,951
Comuna 13	-	-	2,411	2,411	2,411	2,411
Comuna 14	141	329	8,149	8,150	8,149	8,150
Comuna 15	1,449	3,394	5,653	5,653	5,653	5,653
Comuna 16	-	-	2,357	2,358	2,357	2,358
Comuna 17	129	300	4,333	4,334	4,333	4,334
Comuna 18	116	272	3,843	3,843	3,843	3,843
Comuna 19	130	303	4,501	4,502	4,501	4,502
Comuna 20	260	607	7,608	7,609	7,608	7,609
Comuna 21	931	2,179	25,188	25,189	25,188	25,189
Comuna 22	137	319	6,212	6,213	6,212	6,213
TOTAL	5,553	12,989	137,369	137,381	137,369	137,381