

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
ESCUELA DE POSGRADO



**Minimización del Impacto Social en la Ayuda Humanitaria Ante Un Sismo en Lima Metropolitana y Callao, Optimizando la Velocidad de Respuesta Ante Los Sectores Damnificados, Mediante el Uso de Modelos Matemáticos en la Redistribución de Almacenes y Un Plan de Ruteo Eficiente**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE OPERACIONES**

**AUTOR**

Renzo Alejandro Benavente Sotelo

**ASESOR:**

Jonatán Edward Rojas Polo

Julio, 2018

## Resumen

Debido a la ubicación geográfica de Perú existe el peligro sísmico de la ocurrencia de un terremoto de gran magnitud en la ciudad capital. La sociedad se encuentra vulnerable por los siguientes motivos: infraestructura de las viviendas, pocos almacenes adelantados de ayuda humanitaria, insuficiencia de bienes de ayuda humanitaria, y la falta de plan de distribución de estos bienes. Los bienes de ayuda humanitaria deberán ser entregados de manera gratuita dentro de las primeras 72 horas luego de ocurrido el sismo; sin embargo, en la práctica observamos que el tiempo de respuesta es mucho mayor. Por este motivo se presenta una propuesta de la cantidad y ubicación de almacenes de ayuda humanitaria en Lima Metropolitana y Callao, así como un plan de distribución de estos bienes a la población damnificada ante un escenario crítico de terremoto con epicentro frente a Lima. El problema se divide en dos fases: antes y después del sismo. La primera es para determinar la cantidad y ubicación de almacenes fijos, así como el clúster que atienda; y la segunda fase es calcular la cantidad, ubicación y plan de ruteo para el abastecimiento de los almacenes temporales con base en información recopilada luego de ocurrido el sismo. El resultado obtenido es una mayor cobertura, mayor dinamismo y menor tiempo de respuesta frente a un escenario con los planes vigentes. Se simuló un escenario para ejecutar la metodología propuesta y se calcularon 9 clústeres en Lima Metropolitana y Callao con un almacén fijo en cada uno de ellos, y un total de 161 almacenes temporales dispersos por el territorio mencionado.

# ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1 Problema de ruteo de vehículos .....	2
1.1.1 Modelo matemático.....	2
1.1.2 Heurísticas de ruteos .....	3
1.1.3 Variaciones con múltiples depósitos .....	4
1.2 Modelos de localización de almacenes .....	6
1.2.1 Modelo matemático.....	6
1.2.2 Heurísticas de localización de almacenes.....	8
1.2.3 Métodos de clusterización.....	10
1.3 Modelos de ruteo y localización integrados .....	11
1.3.1 Modelo matemático.....	11
1.3.2 Heurísticas de localización y ruteo .....	14
1.4 Estado del arte .....	15
1.4.1 Estrategias para localización y ruteo de ayuda humanitaria .....	15
1.4.2 Estudios previos en Lima .....	17
1.4.3 Caso logística humanitaria en San Francisco .....	18
1.4.3 Selección estratégica .....	22
CAPÍTULO 2. SITUACIÓN ACTUAL.....	23
2.1 Impacto telúrico en Lima Metropolitana y Callao .....	23
2.1.1 Factores topográficos .....	23
2.1.2 Vulnerabilidad sísmica en Lima Metropolitana y Callao.....	24
2.1.3 Escenario de riesgo sísmico .....	25
2.2 Medidas de contingencia actuales.....	28
2.2.1 Planes vigentes .....	28
2.2.2 Caso terremoto en Pisco, 2007.....	32
CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE MEJORA .....	34
3.1 Metodología del modelo propuesto.....	34
3.1.1 Aproximación con enfoque de selección estratégica.....	34
3.1.2 Fases en la metodología.....	39
3.2 Cantidad y ubicación de almacenes fijos.....	40
3.2.1 Determinación del número de almacenes fijos.....	40

3.2.2 Ubicación de los almacenes fijos .....	41
3.3 Cantidad y ubicación de almacenes temporales y ruteo .....	42
3.3.1 Estrategia de información de daños .....	42
3.3.2 Propuesta de clústeres para los almacenes temporales .....	42
3.3.3 Propuesta de rutas para la distribución .....	43
3.3.4 Gestión del tiempo en la propuesta.....	44
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	45
4.1 Fase 1: Almacenes fijos .....	45
4.2 Fase 2: Almacenes temporales .....	48
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
5.1 Conclusiones.....	58
5.2 Recomendaciones.....	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60



# ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.	Ejemplo de solución de un ruteo de vehículos	3
Figura 2.	Etapas para de la heurística de localización de almacenes	10
Figura 3.	Solución de un MDLRP	12
Figura 4.	Ejemplo de probabilidad de obstrucción de vías	16
Figura 5.	Cadena de suministro humanitaria	17
Figura 6.	Cadena de respuesta humanitaria	18
Figura 7.	Puntos de demanda de ayuda humanitaria	19
Figura 8.	Potenciales centros de distribución y posibles depósitos locales	19
Figura 9.	Áreas seleccionadas como punto de demanda	20
Figura 10.	Pseudo código del método VSN	21
Figura 11.	Zonas geotécnicas sísmicas en Lima	23
Figura 12.	Zonas más vulnerables en Lima	27
Figura 13.	Cantidad de almacenes adelantados por región	31
Figura 14.	Áreas afectadas por el terremoto	32
Figura 15.	Impacto en la carretera Panamericana Sur	33
Figura 16.	Vínculos entre las áreas de decisión	36
Figura 17.	Áreas de decisión escogidas como foco	37
Figura 18.	Balance de decisiones	38
Figura 19.	Fases de la metodología propuesta	39
Figura 20.	Contorno de Lima Metropolitana y Callao	46
Figura 21.	Nodos generados dentro de Lima Metropolitana y Callao	46
Figura 22.	Evaluación del valor que toma k	47
Figura 23.	Mapa con los 9 clústeres calculados	48
Figura 24.	Extracto de modelado en AMPL	50
Figura 25.	Mapa de los 30 grupos del clúster 1	51
Figura 26.	Mapa de los 16 grupos del clúster 2	52
Figura 27.	Mapa de los 9 grupos del clúster 3	52
Figura 28.	Mapa de los 30 grupos del clúster 4	53
Figura 29.	Mapa de los 30 grupos del clúster 5	53
Figura 30.	Mapa de los 30 grupos del clúster 6	54
Figura 31.	Mapa de los 30 grupos del clúster 7	54
Figura 32.	Mapa de los 30 grupos del clúster 8	55
Figura 33.	Mapa de los 30 grupos del clúster 9	55
Figura 34.	Mapa de los 161 almacenes temporales	56
Figura 35.	Extracto de modelado en AMPL	57
Figura 36.	Mapa de los 31 grupos del clúster 1	57

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de los suelos por zonas	24
Tabla 2.	Daño por tipo de riesgo	26
Tabla 3.	Tipos planes de Defensa Civil	28
Tabla 4.	Tipos de procesos para la gestión del riesgo	29
Tabla 5.	Esquema de decisiones posibles para almacén único central	37
Tabla 6.	Principales atributos de los distritos limeños	40
Tabla 7.	Pasos para generar nodos en Lima y Callao	45
Tabla 8.	Pasos para evaluar la suma de cuadrados de cada k	46
Tabla 9.	Pasos para clusterizar con k fijado en 9	47
Tabla 10.	Indicador esperado por rangos	48
Tabla 11.	Indicador esperado por rangos	49
Tabla 12.	Extracto de simulaciones por nodo	50
Tabla 13.	Cantidad de almacenes temporales por clúster	51



## LISTA DE ACRÓNIMOS

APESEG – Asociación Peruana de Empresas de Seguros

CFLP – *Capacitated Facility Location Problem*

CISMID - Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres

ECHO - *European Collaboration for Health Optimization*

IGP – Instituto Geofísico del Perú

INDECI – Instituto Nacional de Defensa Civil

INEI – Instituto Nacional de Estadística e Informática

MDLRP – *Multi-Depot Location-Routing Problem*

PNUD – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

POE - Plan de Operaciones de Emergencia de Lima Metropolitana y Región Callao

PREDES – Centro de Estudios y Prevención de Desastres

SINADECI – Sistema Nacional de Defensa Civil

TSP – *Travel Salesman Problem*

UTM – *Universal Transverse Mercator*

VRP – *Vehicle Routing Problem*

# INTRODUCCIÓN

Año tras año se registran pérdidas tanto económicas como personales a causa de terremotos pues gran parte de la población radica en lugares de actividad sísmica alta. Una zona importante es el denominado cinturón de fuego del Pacífico, donde la Placa del Pacífico interactúa con muchas otras circundantes y esto origina numerosos sismos, siendo la zona con mayor actividad telúrica del mundo. Debido al impacto que tienen los desastres como los movimientos sísmicos de gran magnitud en la sociedad, se ha desarrollado por parte de los responsables de la intervención humanitaria una logística que busca ayudar a la población que resulta damnificada.

Perú pertenece a esta zona y se tienen registros durante el siglo XX de terremotos destructivos en la capital en los años 1908, 1932, 1940, 1966 y 1974 (Kuroiwa, 2002). Siendo el último terremoto destructivo hace 42 años, tiempo durante el que se ha ido acumulando energía subterránea por el denominado “silencio sísmico” de tantos años. Además de esto, el Océano Pacífico está estructural, topográfica y sísmicamente condicionado para ser un sistema generador de tsunamis. Por ejemplo, el 28 de octubre de 1746 ocurrió un terremoto en el mar frente a Lima, que originó un devastador tsunami, el cual acabó con la vida de 3 800 pobladores, de un total de 4 000 (SINADECI, 2004).

Es un hecho que se cuentan con almacenes de bienes de ayuda humanitaria; sin embargo, esto no garantiza que lleguen a ser repartidos a tiempo a la población damnificada. Incluso el número de almacenes y su ubicación no es el adecuado según estudios realizados en Lima Metropolitana y Callao. Se tienen instalados 175 almacenes esparcidos en el país entre nacionales, regionales y adelantados. INDECI los clasifica según una jerarquía; por ejemplo los almacenes nacionales son los encargados de abastecer a los almacenes regionales y estos a los almacenes adelantados. Los almacenes adelantados tienen el objetivo de distribuir de manera eficiente los bienes de ayuda humanitaria a la población damnificada (2010).

Lima cuenta con 4 almacenes adelantados y no se daría abasto para cubrir con la demanda local y tendría que recurrir a almacenes de otras provincias. Según INDECI (2010), estos bienes deben ser distribuidos de manera gratuita e inmediata a la población damnificada durante las primeras 72 horas de ocurrido un desastre. El 15 de agosto de 2007 ocurrió un terremoto en la provincia de Pisco dañando casi al 80% de viviendas existentes. La demora en la repartición de ayuda fue excesiva, y de haber ocurrido en Lima sería igual o peor. Esto sirve como motivación para realizar estudios en este rubro y proponer una reubicación de almacenes y plan de ruteo para garantizar con la entrega oportuna de ayuda humanitaria dentro del plazo de las 72 horas.



# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentará una descripción detallada del problema de ruteo de vehículos, el problema de ubicación de almacenes y una integración de ambos. Finalmente se presentarán casos de estudio que aplican estos modelos matemáticos a temas relacionado con la ayuda humanitaria.

## 1.1 Problema de ruteo de vehículos

En esta sección se explicará la notación empleada en el modelamiento matemático, el uso de heurísticas para poder resolverlo como alternativa y finalmente una variación del problema original considerando múltiples depósitos.

### 1.1.1 Modelo matemático

Los problemas de ruteo buscan generar circuitos para que una flota de vehículos, partiendo del almacén, atienda la demanda de un grupo de nodos. Toth y Vigo (2002) se basan en un gráfico completo definido por  $G = (V, A)$  donde  $V = (0, 1, 2, \dots, n)$  es el conjunto de vértices y  $A$  es el conjunto de arcos resultado de la unión de los vértices. Los vértices  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  representan clientes, dentro del subconjunto  $N$ ; teniendo como depósito al vértice 0. Cada arco  $(i, j)$  que pertenece al conjunto  $A$ , presenta un costo no negativo asociado  $c_{ij}$  que indica el costo por haber ido del vértice  $i$  al vértice  $j$ . Cada cliente tiene una demanda  $d_i$  que debe ser atendida, a excepción del depósito pues tiene una demanda ficticia igual a 0.

El modelo tiene la siguiente función objetivo según la nomenclatura de Toth y Vigo (2002):

$$\text{Min} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = |K| \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subseteq N, S \neq \emptyset \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (6)$$

La función objetivo busca minimizar el costo total como se muestra en (1), generalmente representado por la distancia total recorrida. Las restricciones (2) y (3) limitan a solo una entrada y salida de cada nodo garantizando que todas sean visitadas. La restricción (4) indica el número de vehículos  $k$  que parten del depósito. La restricción (5) limita la capacidad de carga para cada vehículo  $k$ . Finalmente, la restricción (6) define al modelo como uno entero binario que vale 1 cuando por el arco  $(i, j)$  circula un vehículo, o cero en caso contrario. En la figura 1 se ilustra una solución factible para este modelo, en el cual se atienden a los clientes  $v_5$  y  $v_1$  en un circuito, y a los clientes  $v_4$ ,  $v_3$  y  $v_2$  en otro circuito.

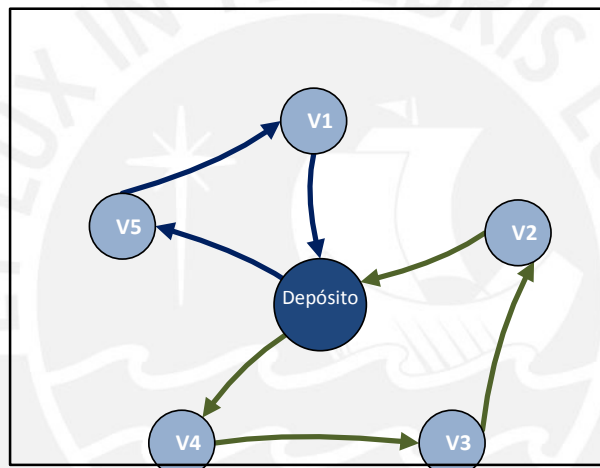


Figura 1. Ejemplo de solución de un ruteo de vehículos

### 1.1.2 Heurísticas de ruteos

Los VRP son clasificados como problemas NP-hard, pues es muy difícil resolverlos, así, un VRP con solo un vehículo y 15 clientes que abastecer, tendría más de seiscientos mil millones de rutas posibles (Dantzig y Ramser, 1959). Esto se complica más al aumentar el número de vehículos y clientes. Es por este motivo que se sugiere recurrir a métodos heurísticos. A continuación se explican brevemente algunos métodos heurísticos.

Uno de los algoritmos más difundidos para los VRP es el algoritmo de ahorros el cual propone un procedimiento para obtener una solución óptima o una bastante cercana a la óptima, de manera rápida (Clarke y Wright, 1964). Se basa en el cálculo de un ahorro definido por la disminución en distancia luego de crear nuevas rutas con base en la activación de un arco. Para tener una solución inicial factible se considera que cada ruta

visita un único cliente y regresa al depósito. Luego de esto se calculará el ahorro para cada arco posible y se realizará el procedimiento descrito. Esto se repetirá hasta que ya no se encuentren ahorros positivos.

Otra heurística es la del método en dos fases que obtiene una solución factible cercana a la óptima rápidamente para mediana y gran escala (Gillett y Miller, 1974). El algoritmo cuenta con 2 fases: primero agrupa clientes en clústeres, respetando las restricciones de capacidad de carga de los vehículos dentro de una misma ruta; luego, se crea un circuito que minimice la distancia total recorrida para cada clúster. Para la primera fase se podría usar el método del barrido que consiste en formar agrupaciones factibles de clientes al rotar un radio con centro en el depósito, para luego crear una ruta para cada agrupación. Cuando ya todos los clientes estén agrupados en clústeres, se obtendrá una ruta óptima para cada clúster por separado. Estas rutas pueden ser optimizadas resolviendo el problema del agente viajero (TSP por sus siglas en inglés Traveling Salesman Problem) que puede ser descrito como un VRP en el cual se dispone de un solo vehículo. Un modelo de programación lineal entera mixta para resolver este problema se ilustra a continuación (Miller, Tucker y Zemlin, 1960):

Función objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} x_{ij} \quad i \neq j \quad (7)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (9)$$

$$u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1 \quad 1 \leq i \neq j \leq n \quad (10)$$

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

$$u_i \in \mathbb{Z} \quad \forall i \in N \quad (12)$$

### 1.1.3 Variaciones con múltiples depósitos

El modelo del problema de ruteo de vehículos puede presentar muchas variantes como por ejemplo no partir de un único depósito, sino contar con un conjunto de estos (Toth y Vigo, 2002). En este caso, cada ruta inicia y termina en un depósito específico, dentro de un conjunto de depósitos, luego de visitar a una secuencia de clientes (Rybickova, Brodsky, Karaskova y Mockova, 2015). Esta variante con múltiples depósitos del modelo

VRP original se denomina MDVRP, por sus siglas en inglés. El modelo de programación lineal entera mixta para este caso se presenta a continuación (Mirabi, Ghomi y Jolai, 2010).

**Conjuntos:**

- I = Conjunto de los depósitos
- J = Conjunto de los clientes
- K = Conjunto de los vehículos

**Parámetros:**

- N = Cantidad de clientes
- $C_{ij}$  = Distancia entre cada par de nodos  $i, j$
- $V_i$  = Capacidad máxima del depósito  $i$
- $d_j$  = Demanda del cliente  $i$
- $Q_k$  = Capacidad del vehículo  $k$

**Variables de decisión:**

- $X_{ijk}$  = Decisión de tomar la ruta  $ij$  con el vehículo  $k$
- $Z_{ij}$  = Decisión de asignar el depósito  $I$  al cliente  $j$
- $u_{lk}$  = Orden en que el vehículo  $k$  visita el nodo  $l$

**Función objetivo:**

$$\text{Min} \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} C_{ij} x_{ijk} \quad (13)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$u_{lk} - u_{jk} + N x_{ljk} \leq N - 1 \quad \forall l, j \in J, k \in K \quad (16)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in J \cup I, k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{j \in J} d_j z_{ij} \leq V_i \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ujk}) \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (20)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (21)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (22)$$

$$u_{lk} \geq 0 \quad \forall l \in J, k \in K \quad (23)$$

La función objetivo busca minimizar la distancia total recorrida en todas las rutas. La restricción (14) asigna cada cliente a solo una ruta y la (15) es la restricción de capacidad del vehículo. Los sub tours son eliminados con la restricción (16), mientras que la restricción (17) le da la lógica de equilibrio del flujo de productos, complementándose con la (18) que limita que cada ruta se realiza solo una vez a lo mucho. La capacidad del almacén se delimita en la (19) y la (20) especifica que cada cliente es asignado solo a un depósito siempre y cuando haya una ruta de ese depósito al cliente. Las últimas tres restricciones declaran el rango de existencia de las variables.

## 1.2 Modelos de localización de almacenes

En esta sección se presentará una descripción del problema de localización de almacenes y algunos modelos matemáticos de programación lineal entera para determinar una ubicación óptima, así como la discusión de la dificultad de resolverlos en un tiempo apropiado con métodos exactos. Finalmente, se presentará algunas heurísticas como alternativa de resolución frente a las limitaciones de los métodos exactos.

### 1.2.1 Modelo matemático

De manera general existen varias estrategias para la ubicación de un almacén como por ejemplo con un enfoque de centro de gravedad para ubicar un único almacén considerando distancias entre nodos (IACOB, 2014). Si se desea ubicar varios almacenes, un modelo de localización considera  $n$  potenciales lugares para implementar  $p$  almacenes; estos dos valores son por lo general parámetros del problema. El modelo de programación lineal binaria para estos casos (Bargos, de Queiroz Lamas, Bargos, Neto, Pardal, 2016) tiene como variables a  $X_{ij}$ , que indica si el cliente  $j$  fue atendido por el almacén  $i$ ; y la variable  $Y_i$  que determina si se construirá un almacén en el lugar  $i$ . Utiliza un conjunto  $N$  que representan los  $n$  lugares potenciales donde se podría

construir un almacén, así como los clientes, los cuales están a una distancia  $d_{ij}$  uno del otro.

El problema se formula con la siguiente función objetivo:

$$Min = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (24)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (25)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i, j \in N \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = p \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (27)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (28)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (29)$$

La primera restricción garantiza que cada cliente sea asignado a solo un almacén y se complementa con la siguiente restricción que asegura que este almacén efectivamente se haya construido. Finalmente, la restricción (27) fija el total de almacenes a ser construidos. Como rango de existencia, tanto la variable  $y_i$  como la  $x_{ij}$  son binarias.

Por otro lado, se puede complementar este modelo asignando una demanda a cada cliente y distinguir entre los nodos que son potenciales ubicaciones de almacén de los que son clientes exclusivamente. Según Chopra y Meindl (2013) un modelo de optimización de localización de almacenes que además considera que un cliente puede ser abastecido de más de un almacén requiere los siguientes datos:

- $n$  = Número de posibles ubicaciones de almacenes
- $m$  = número de puntos de demanda
- $D_j$  = demanda del punto  $j$
- $K_i$  = Capacidad del potencial almacén
- $f_i$  = Costo fijo del potencial almacén  $i$
- $c_{ij}$  = Costo de trasladar bienes del almacén  $i$  al punto  $j$

Teniendo las siguientes variables de decisión:

$y_i = 1$  si el almacén se instala, 0 si está cerrado.

$x_{ij}$  = Cantidad enviada desde el almacén  $i$  al punto  $j$

El problema se formula con la siguiente función objetivo:

$$Min = \sum_{i=1}^n f_i y_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad (30)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq K_i y_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (32)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (33)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (34)$$

La función objetivo busca minimizar el costo total que incluye fijo y variable. La restricción (31) garantiza que se logre cubrir toda la demanda mientras que la restricción (32) limita que la cantidad entregada desde el almacén no sobrepase su capacidad en caso se decida seleccionar. Las restricciones (33) y (34) indican el rango de existencia de las variables  $y_i$  y  $x_{ij}$  como binarias y no negativas, respectivamente.

### 1.2.2 Heurísticas de localización de almacenes

Similar al problema de ruteo de vehículos, el problema de localización de almacenes está categorizado como un NP-hard por lo que el tiempo de ejecución incrementará considerablemente conforme se vaya incrementando el número de nodos (Eiselt y Sandblom, 2013). A continuación se revisarán heurísticas para este problema, las cuales no garantizan obtener el óptimo; sin embargo, son de rápida ejecución.

Una publicación presenta un modelo de localización que maximiza la utilidad conseguida al implementar un grupo de almacenes incluyendo costos de instalación y costos de transporte (Flores y Oliva, 2016). Una de las heurísticas que presenta es de tipo golosa que sigue el siguiente procedimiento:

#### Paso 0:

Inicializar  $d_t = 0$  y  $o_t = 0$

Paso 1:

Para (k = 1 hasta k = p)

Hacer  $J = \operatorname{argmax}_{i \in N} (g(i) - c(i))$

Hacer  $dt = dt + d(J)$

Paso 2:

Mientras (dt > ot)

Hacer  $I = \operatorname{argmin}_{i \in (N-J)} (f(i)/q(i))$

Hacer  $ot = ot + q(I)$

Paso 3:

Resolver el problema

$$Max = \sum_{i \in J} (g(i) - c(i)) - \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} h_{ij} x_{ij} - \sum_{i \in I} f(i) \quad (35)$$

Sujeto a:

$$y_j = 0 \quad \forall j \in (N - I) \quad (36)$$

$$y_j \leq q_j w_j \quad \forall j \in N \quad (37)$$

$$\sum_{i \in N} a_{ij} x_{ij} - \sum_{i \in N} a_{ji} x_{ji} = d_k z_k - y_l \quad \forall j \in N, k \in J, l \in I \quad (38)$$

En resumen, primero se escogen los centros de distribución con mayor utilidad, es decir la ganancia menos el costo de instalación quienes vendrían a ser los clientes en un modelo general de localización. Luego, se escoge dónde colocar los almacenes buscando minimizar la razón costo/capacidad sin considerar los nodos que ya son centros de distribución. Por último, se resuelve el modelo simplificado del paso 3. Esta heurística tiene un considerablemente bajo tiempo de ejecución comparado con el método exacto; sin embargo cuando se incrementan los nodos la diferencia en los resultados superan el 1%

Para problemas de localización de mayor escala existen otras heurísticas como la de Avella, Boccia, Sforza y Vasil'ev (2009) que está basada en una relajación Lagrangiana para seleccionar un conjunto de potenciales variables que formarán parte de un modelo principal que será resuelto por un algoritmo rama y corte.



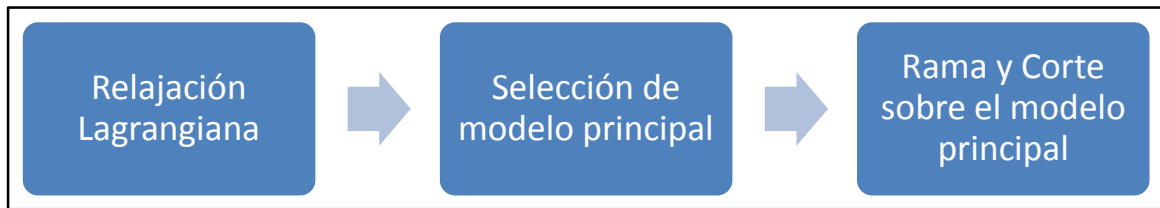


Figura 2. Etapas para de la heurística de localización de almacenes

Fuente: Avella, Boccia, Sforza y Vasil'ev (2009)

### 1.2.3 Métodos de clusterización

Una estrategia previa a la ubicación de varios almacenes es realizar un agrupamiento previo de los puntos de demanda de tal manera que a cada uno se le asigne un almacén y el problema se reduce considerablemente. Uno de los métodos más usados es el algoritmo de k medias que agrupa los individuos de una población de datos según alguna característica en particular (Steinhaus, 1956). El objetivo del algoritmo k medias es dividir M puntos de N dimensiones en K clústeres para que la suma de cuadrados dentro del clúster sea minimizada (Hartigan y Wong, 1979). En la publicación de Hartigan y Wong (1979) sintetizan el algoritmo en los siguientes pasos:

- Paso 1. Para cada punto I ( $I = 1, 2, \dots, M$ ), encuentre sus centros de clúster más cercanos y los más cercanos, IC1 (I) e IC2 (I), respectivamente. Asigna el punto I al clúster IC1 (I).
- Paso 2. Actualice los centros de clúster para que sean los promedios de los puntos contenidos en ellos.
- Paso 3. Inicialmente, todos los clústeres pertenecen al conjunto en vivo.
- Paso 4. Esta es la etapa de transferencia óptima (OPTRA):

Considera cada punto I ( $I = 1, 2, \dots, M$ ) sucesivamente. Si el grupo L ( $L = 1, 2, \dots, K$ ) se actualiza en la última etapa de transferencia rápida (QTRAN), entonces pertenece al conjunto en vivo a lo largo de esta etapa. De lo contrario, en cada paso, no estará en el set vivo si no se ha actualizado en los últimos pasos de M. Deje que el punto I esté en el grupo L1. Si L1 está en el set vivo, haga el Paso 4a; de lo contrario, haz el Paso 4b.

- Paso 4a. Calcule el mínimo de la cantidad,  $R2 = [NC(L) * D(I, L)^2] / [NC(L) + 1]$ , sobre todos los clústeres L ( $L \neq L1, L = 1, 2, \dots, K$ ). Deje que L2 sea el clúster con el R2 más pequeño. Si este valor es mayor o igual que  $[NC(L1) * D(I, L1)^2] / [NC(L1) - 1]$ , no es necesaria ninguna reasignación y L2 es el nuevo IC2 (I). (Tenga en cuenta que el valor  $[NC(L1) * D(I, L1)^2] / [NC(L1) - 1]$  se recuerda y seguirá siendo el mismo para el punto I hasta que se actualice el grupo L1.) De lo contrario, el punto I asignado al clúster L2 y L1 es el nuevo IC2 (I). Los centros

de grupo se actualizan para que sean los medios de los puntos asignados si se ha realizado la reasignación. Los dos grupos que están involucrados en la transferencia del punto  $I$  en este paso particular ahora están en el conjunto en vivo.

- Paso 4b. Este paso es el mismo que el Paso 4a, excepto que el  $R2$  mínimo se calcula solo sobre los clústeres en el conjunto en vivo.
- Paso 5. Detener si el set vivo está vacío. De lo contrario, vaya al paso 6 después de pasar por el conjunto de datos.
- Paso 6. Esta es la etapa de transferencia rápida (QTRAN):  
Considera cada punto  $I$  ( $I = 1, 2, \dots, M$ ) sucesivamente. Deje  $L1 = IC1(I)$  y  $L2 = IC2(I)$ . No es necesario verificar el punto  $I$  si los dos grupos,  $L1$  y  $L2$ , no han cambiado en los últimos  $M$  pasos. Calcule los valores  
 $R1 = [NC(L1) * D(I, L1)^2] / [NC(L1) - 1]$  y  $R2 = [NC(L2) * D(I, L2)^2] / [NC(L2) + 1]$ .  
(Como se señaló anteriormente, se recuerda a  $R1$  y seguirá siendo el mismo hasta que se actualice el grupo  $L1$ ).  
Si  $R1$  es menor que  $R2$ , el punto  $I$  permanece en el grupo  $L1$ . De lo contrario, cambie  $IC1(I)$  e  $IC2(I)$  y actualice los centros de los conglomerados  $L1$  y  $L2$ . Los dos clústeres también se destacan por su participación en una transferencia en este paso.
- Paso 7. Si no se realizó ninguna transferencia en los últimos  $M$  pasos, vaya al Paso 4. De lo contrario, vaya al Paso 6.

### 1.3 Modelos de ruteo y localización integrados

En esta sección se presentará una descripción del problema integrado de localización y ruteo de vehículos, la explicación de la notación empleada y un modelo matemático de programación lineal entera que busca resolverlo. Similar a los problemas por separado, se presentará algunas heurísticas como alternativa de resolución frente a las limitaciones de los métodos exactos.

#### 1.3.1 Modelo matemático

Los problemas de localización de almacenes y de ruteo de vehículos se veían de manera independiente; sin embargo, el óptimo en cada caso por separado no garantiza un óptimo de manera integral pues las rutas dependerán de la ubicación escogida (Papadimitriou, Colle, Demeester, 2016). Se desarrolló un modelo matemático que integró estos dos problemas en uno solo (Perl y Daskin, 1985). La figura 3 ilustra una solución para este problema integral con 55 clientes que atender y 15 potenciales lugares para construir almacenes. Se observa que se escogieron sitios para construir almacenes y se realizarán 10 rutas en total.

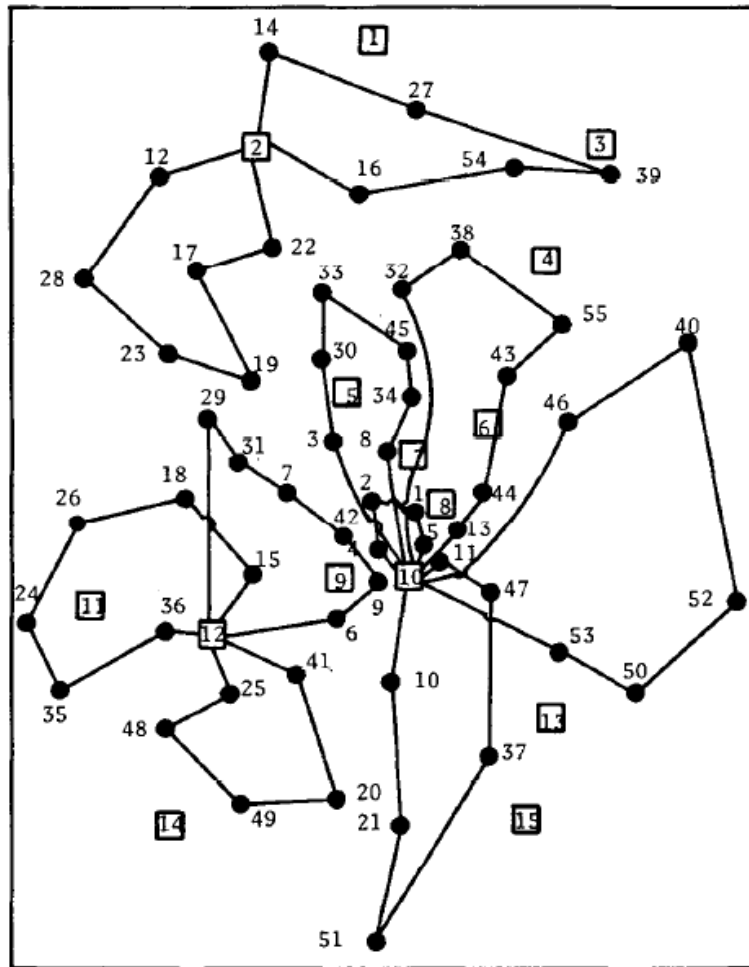


Figura 3. Solución de un MDLRP

Fuente: Perl y Daskin (1985)

Este modelo se denomina problema de ruteo y localización con múltiples depósitos o MDLRP por sus siglas en inglés. Tiene como parámetros la cantidad, ubicación y demanda de los clientes, así como la cantidad y ubicación de los potenciales almacenes y el tipo y tamaño de la flota de vehículos. El modelo original ha ido perfeccionándose a lo largo de los años; producto de esto se obtuvo el siguiente modelo de programación lineal entera mixta (Wu, Low y Bai, 2002) que busca satisfacer la demanda de los clientes por exactamente un vehículo, respetando la capacidad del mismo, iniciando y terminando en depósitos.

Conjuntos:

$I$  = Conjunto de potenciales ubicaciones para los almacenes

$J$  = Conjunto de todos los clientes

$K$  = Conjunto de todos vehículos

Parámetros:

$N$  = Cantidad de clientes  
 $C_{ij}$  = Distancia entre los nodos  $i$  y  $j$   
 $G_i$  = Costo fijo por construir un almacén en la ubicación  $i$   
 $F_k$  = Costo fijo por usar el vehículo  $k$   
 $V_i$  = Capacidad máxima del depósito  $i$   
 $D_j$  = Demanda del cliente  $j$   
 $Q_k$  = Capacidad del vehículo  $k$

**Variables de decisión:**

$x_{ijk}$  = Decisión de tomar la ruta de  $i$  hacia  $j$  utilizando el vehículo  $k$   
 $y_i$  = Decisión de abrir un depósito en la ubicación  $i$   
 $z_{ij}$  = Decisión de asignar el depósito  $i$  para abastecer al cliente  $j$   
 $u_{lk}$  = Orden de visita del cliente  $l$  con el vehículo  $k$

**Función objetivo:**

$$\text{Min} \sum_{i \in I} G_i y_i + \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} C_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} F_k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \quad (39)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J \quad (40)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad (41)$$

$$u_{lk} - u_{jk} + N x_{ljk} \leq N - 1 \quad \forall l, j \in J, k \in K \quad (42)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in J \cup I, k \in K \quad (43)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (44)$$

$$\sum_{j \in J} d_j z_{ij} \leq V_i y_i \quad \forall i \in I \quad (45)$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ujk}) \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (46)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (47)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (48)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (49)$$

$$u_{lk} \geq 0 \quad \forall l \in J, k \in K \quad (50)$$

La función objetivo minimiza todos los costos relacionados a este problema. La restricción (40) asigna a todos los clientes a exactamente una ruta, mientras que la (41) y (45) limitan la capacidad del vehículo y del almacén, respectivamente. La restricción (42) es una versión mejorada para eliminar *sub-tours* en la solución. La siguiente restricción brinda la lógica de equilibrio de flujo en cada nodo asegurando con la restricción (44) que cada ruta se haga a lo mucho una vez. La restricción (46) garantiza que el cliente  $j$  será asignado al depósito  $i$  solo si se encuentran dentro de una ruta. Las últimas 4 restricciones son para determinar el rango de existencia de las variables.

### 1.3.2 Heurísticas de localización y ruteo

En la sección 1.1.2 y 1.2.2 se indicó que los problemas de localización de almacenes, y los de ruteo son categorizados como NP-hard debido a su complejidad computacional. Ya que ambos problemas pertenecen a esta categoría, el problema de localización y ruteo es también un NP-hard (Sadegheih, 2017). Una propuesta de heurística fue dividir el problema en 3 sub problemas: un problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos, un problema de localización de almacenes y un MDLRP propiamente dicho (Perl y Daskin, 1985). Años después se publicó algoritmos más eficientes pero con la misma lógica de partición del problema (Hansen, Hegedahl, Hjortkjaer y Obel, 1994).

El primer sub problema asume que todos los potenciales lugares para construir almacenes son empleados, ignorando las restricciones de capacidad de estos, y se obtienen rutas. Estas rutas sirven de dato de entrada para el segundo sub problema y con esto se obtiene la cantidad y ubicación de los almacenes, así como la asignación de rutas a estos almacenes. Finalmente, esto es *input* para calcular el tercer sub problema y reasignar clientes a los almacenes y recalculando rutas. Este proceso se repite iterativamente hasta encontrarse con un criterio de convergencia. Cada uno de los sub problemas puede ser resuelto con heurísticas o con métodos exactos.

Una variante de esta heurística fue propuesta empleando solo dos sub problemas: una primera fase de localización de almacenes, y luego una segunda fase de ruteo de vehículos (Wu, Low y Bai, 2002). En cada iteración las rutas se unifican para incluir a más clientes y asignados a los almacenes seleccionados teniendo en cuenta las restricciones de capacidad. Debido a la dificultad computacional de cada fase, se recomienda trabajar con heurísticas.

## 1.4 Estado del arte

En los últimos años se han realizado numerosos estudios sobre la logística humanitaria aplicando modelos de programación lineal entera mixta. En esta sección se explorarán los estudios de este campo aplicado a la localización y la distribución de ayuda humanitaria en la fase de respuesta tras un desastre natural como un sismo.

### 1.4.1 Estrategias para localización y ruteo de ayuda humanitaria

Una de las principales actividades en la fase de respuesta ante un desastre natural es la distribución de bienes de ayuda humanitaria desde almacenes hacia la población damnificada. Por esta razón es importante determinar los parámetros necesarios para las funciones objetivo y restricciones en la distribución de logística humanitaria (Safeer, Anbuudayasankar, Balkumar y Ganesh, 2014). La publicación indica que la base para una buena distribución es el ruteo de vehículos y la localización de almacenes. Los tipos de funciones objetivos para un modelo integrado de localización y ruteo pueden ser los siguientes o la combinación de los mismos:

- Minimizar costo de viaje
- Minimizar costo de distribución de ayuda
- Minimizar distancia recorrida
- Minimizar tiempo de transporte
- Minimizar tiempo de carga y descarga
- Maximizar satisfacción de la demanda
- Maximizar cobertura de la ayuda

Por otro lado, los modelos de este tipo también tienen restricciones más usadas como las siguientes:

- Cumplir con la demanda de damnificados
- Respetar el presupuesto para la distribución
- Completar la distribución dentro de un límite de tiempo
- Atender a toda la población damnificada

- Respetar capacidad de los vehículos
- Vehículos inician y terminan las rutas en un depósito
- Respetar la capacidad de los almacenes

De manera complementaria, algunos estudios añaden un factor de probabilidad que las vías resulten bloqueadas y tengan que tomar rutas alternas en estos escenarios (Hamedi, Haghani y Yang, 2012). En la figura 4 se ilustra un ejemplo en el que se tiene que distribuir ayuda del nodo 1 al nodo 5. Si se toma la ruta 1-2-4-5 la distancia es 3 y si se toma la ruta 1-3-4-5 la distancia es 4. Sin embargo, la vía 2-4 tiene un 50% de colapsar, mientras que la misma probabilidad en la vía 3-4 es de 20% por lo que se podría preferir una ruta más larga pero con menos tendencia al colapso.

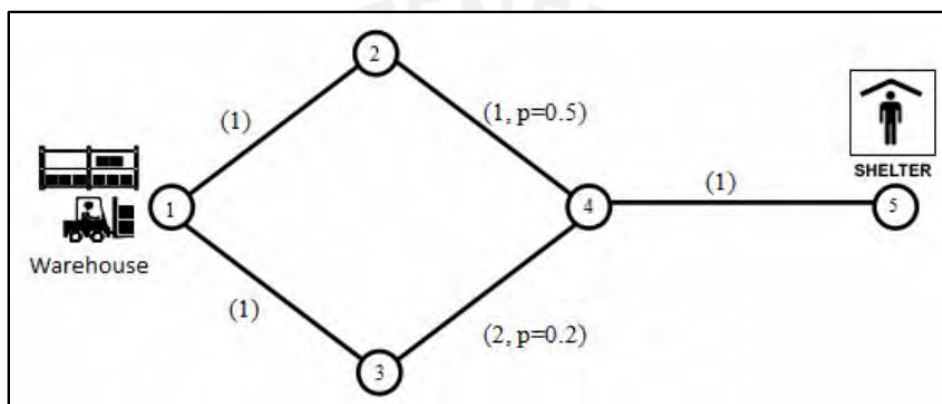


Figura 4. Ejemplo de probabilidad de obstrucción de vías  
Fuente: Hamedi, Haghani y Yang (2012)

Los bienes de ayuda humanitaria tienen una cadena de suministro que puede empezar en varios proveedores y finalmente llegar a la población damnificada (Clark y Culkin, 2013). La figura 5 muestra esta cadena como una red de trasbordo en la que la cantidad distribuida dependerá directamente de lo que soliciten los receptores finales. La mayor dificultad se encuentra en la última etapa en la que se reparten desde los almacenes hacia los receptores.

Otro punto importante a considerar es que la demanda no es determinística en estos casos. Se puede estimar el impacto que puede tener un escenario de terremoto en la sociedad; sin embargo, no se tendrá la certeza del número de damnificados ni de los caminos dañados. Por esta misma característica de incertidumbre de la demanda algunos autores crean modelos robustos que lidien con esto y obtener un escenarios más cercano a la realidad (Chang, Zhou, Chen y Chen, 2017) lo que se expresa por una demanda estocástica.

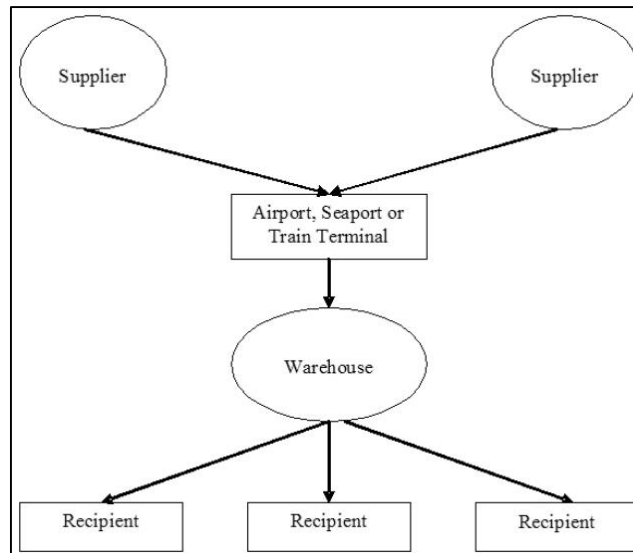


Figura 5. Cadena de suministro humanitaria

Fuente: Clark y Culkin (2013)

#### 1.4.2 Estudios previos en Lima

Debido a la vulnerabilidad sísmica de Lima Metropolitana y Callao, se hizo un estudio para evaluar el número actual de almacenes adelantados en la capital (Cornejo, Vargas, Aragón y Serpa, 2013). En esta investigación se trabajó sobre un escenario de sismo de 8 Mw con epicentro frente a la capital limeña estimando una cantidad de damnificados de casi dos millones. Se desarrolló un modelo de programación entera mixta para minimizar la distancia recorrida desde el almacén “i” hacia el distrito afectado “j” variando la cantidad de almacenes entre 17 y 37 locales. Como conclusión se sugiere evaluar el beneficio marginal por cada sol invertido y cruzarlo con el presupuesto. Una buena solución es tener 17 almacenes, con una capacidad de 275 000 *kits* y una distancia total recorrida de 291 kilómetros.

Teniendo como base este mismo escenario de sismo de 8 Mw, se realizaron investigaciones sobre cómo distribuir la ayuda humanitaria y proponer rutas que deberán seguir los vehículos designados. Por ejemplo, se diseñó una propuesta de ruteo partiendo de 2 almacenes centrales con el objetivo de distribuir ayuda médica a 27 puntos de acopio (Vargas, Medina y Alva, 2015). Para esta investigación se realizó una estrategia de agrupar en 6 clústeres los puntos de acopio y luego realizar un ruteo TSP para garantizar la visita a cada punto. Otro ejemplo de investigación propuso 42 almacenes que abastecerían a 2100 puntos de demanda (Benavente y Cornejo, 2017). Se realizó un ruteo para cada uno de los 42 almacenes teniendo un total de 397 rutas distintas y se tuvo como restricción distribuir la ayuda en menos de 72 horas.



### 1.4.3 Caso logística humanitaria en San Francisco

Un caso de estudio en San Francisco mostró un modelo para la operación de logística humanitaria, el cual considera fallas en la red y un tiempo límite de respuesta (Ahmadi, Seifi y Tootooni, 2015). Es un MDLRP más realista pues tras un terremoto de gran magnitud, muchas vías resultarían destruidas provocando un incremento en el tiempo de transporte. En la figura 6 se ilustran los centros de distribución (DC) que abastecen a puntos de demanda agregada (ADP) buscando minimizar costos de transporte; estos abastecen a su vez a los depósitos locales (LD) que satisfarán la demanda de las zonas de análisis de tráfico (TAZ). El estudio se realizó para la ciudad de San Francisco pues es una de las ciudades más telúricas de Estados Unidos de América. En la figura 7 se ilustra 733 zonas de análisis de tráfico de la ciudad de San Francisco.

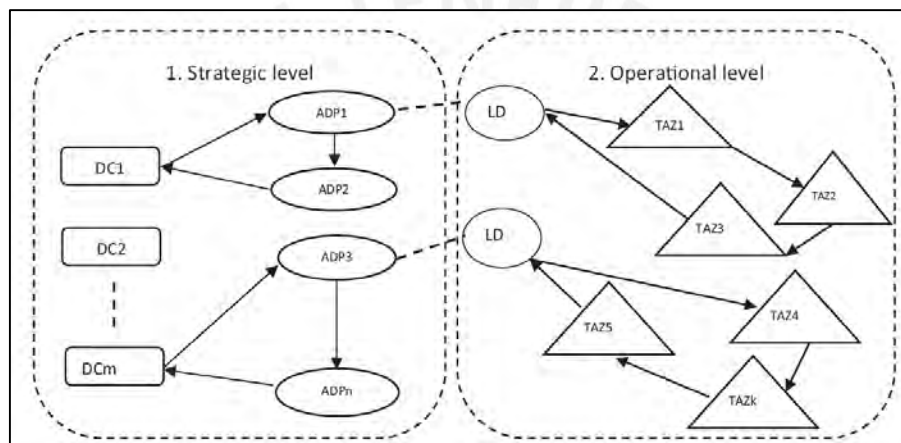


Figura 6. Cadena de respuesta humanitaria

Fuente: Ahmadi, Seifi y Tootooni (2015)

Se dio una solución para 30 TAZ en el noreste de San Francisco para así reducir el tamaño del problema. En la figura 8 se muestran los 13 ADP que eran principalmente colegios en íconos verdes, así como 6 posibles ubicaciones de centros de distribución en íconos azules. Así mismo, se seleccionaron 15 puntos que serán los más probables de resultar afectados por un sismo, pintados de color rojo en la figura 9.

Este caso de estudio se trata de un MDLRP de gran escala por la cantidad de nodos y por esto es necesario el uso de heurísticas. Se escogió la metaheurística de búsqueda de vecindad variable, VNS por sus siglas en inglés. Este método cambia sistemáticamente el tamaño de la vecindad cuando se llega a un mínimo local o cuando se sale de un valle en un intento por escapar de una trampa de un mínimo local. Se cuenta con dos fases principales luego de la iniciación: fase de agitación y fase de búsqueda.



Figura 7. Puntos de demanda de ayuda humanitaria  
 Fuente: Ahmadi, Seifi y Tootooni (2015)

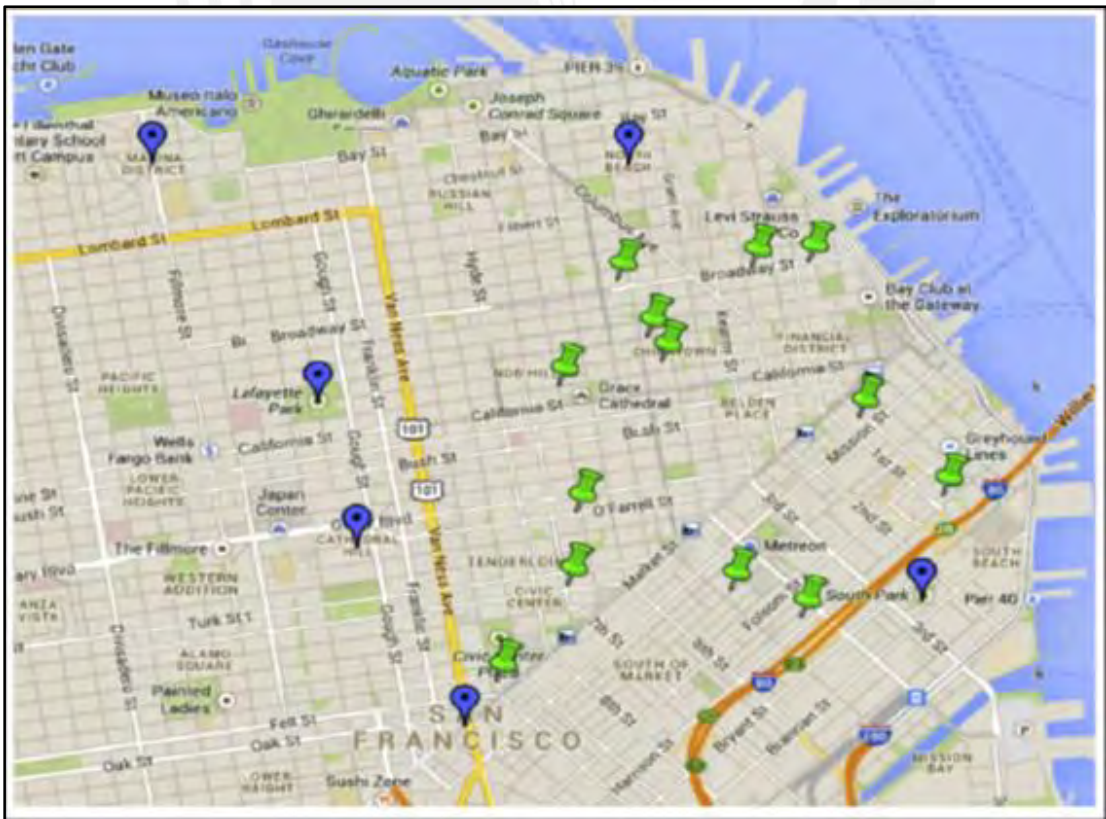


Figura 8. Potenciales centros de distribución y posibles depósitos locales  
 Fuente: Ahmadi, Seifi y Tootooni (2015)

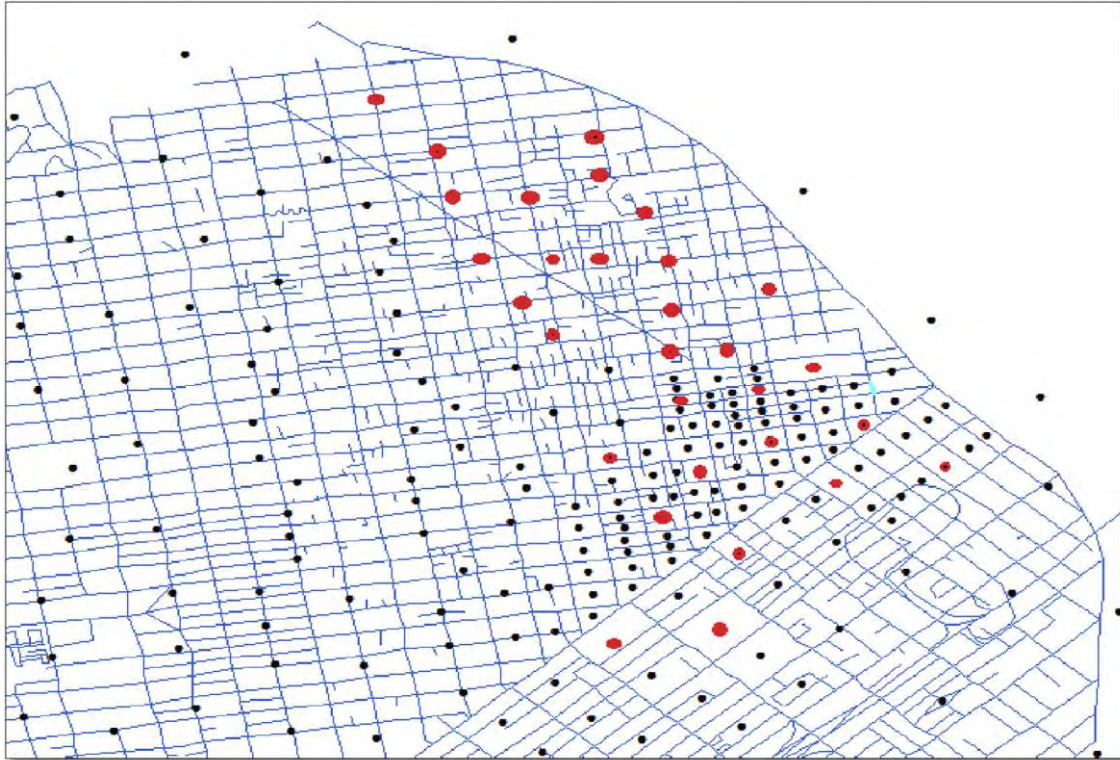


Figura 9. Áreas seleccionadas como punto de demanda

Fuente: Ahmadi, Seifi y Tootooni (2015)

En la inicialización se utiliza el método de Pirkwieser y Raidl (2010) para determinar el número y localización de los depósitos. Dada la demanda de todas las zonas afectadas, los depósitos se eligen aleatoriamente y se abren uno a uno hasta que su capacidad combinada sea mayor o igual que la demanda total. Luego, cada punto de demanda se asigna al almacén abierto más cercano siempre y cuando haya suficiente mercancía para entregar a ese punto; caso contrario, es suministrado por el segundo depósito más cercano. Para el ruteo la solución inicial se realiza con el método de ahorro de Clarke y Wright (1964) para cada uno de los depósitos.

En la fase de agitación se utilizan cinco estructuras de vecindad diferentes para generar una solución  $x'$  y los operadores respectivos se utilizan en el mismo orden que se describe a continuación:

Inserción (intra-ruta): El operador de inserción elimina aleatoriamente a un cliente de la posición  $i$  de una ruta y lo inserta entre otros dos clientes sucesivos en la posición  $j$  en la misma ruta.

Intercambio (swap de ruta): El operador de intercambio elige dos clientes en una ruta de forma aleatoria e intercambia sus posiciones en la misma ruta.

Or-opt (inter e intra ruta): Este operador es una generalización del operador de inserción. Elimina aleatoriamente un conjunto de clientes sucesivos y luego los inserta entre otros dos clientes aleatorios sucesivos. Puede implicar un conjunto de clientes en diferentes rutas o la misma ruta.

Inverso Or-opt (inter e intra ruta): Un inverso Or-opt operador actúa en la forma opuesta al Or-opt. Elimina aleatoriamente un conjunto de clientes consecutivos de sus lugares actuales y los reinserta entre otros dos clientes aleatorios sucesivos en el orden inverso, comenzando con el último cliente en la secuencia y terminando con el primero. Similar a un operador de Or-opt, puede implicar un conjunto de clientes en diferentes rutas.

Apertura/clausura de depósitos: Un operador de apertura de depósitos o de cierre ha sido diseñado sólo para el sub problema de localización. Basándose en una solución inicial dada  $x$ , algunos depósitos potenciales se seleccionan para abrirse y los otros se fijan para ser cerrados. Este operador abre algunos de los depósitos (no seleccionados en la solución inicial) y asigna los puntos de demanda más cercanos a ellos. Este operador podría cerrar algunos de los depósitos existentes y reasignar sus puntos de demanda designados a algunos depósitos más cercanos.

En la primera política de mejora, la búsqueda terminará justo después de encontrar la primera solución  $x''$  que es mejor que  $x$ . Sin embargo, la mejor política de mejora continuará hasta que encuentre la mejor solución  $x''$  que logre minimizar la función objetivo. El enfoque empleado utiliza la primera política de mejora para disminuir el tiempo de ejecución en la fase de búsqueda local. El último paso en el algoritmo es evaluar la función objetivo del modelo de logística operacional. En la figura 10 se muestra el pseudo código de la metaheurística descrita.

```
Function VNS( $x, k_{max}, t_{max}$ );  
1 repeat  
2    $k \leftarrow 1$ ;  
3   repeat  
4      $x' \leftarrow Shake(x, k)$  /* Shaking */;  
5      $x'' \leftarrow FirstImprovement(x')$  /* Local search */;  
6     NeighbourhoodChange( $x, x'', k$ ) /* Change neighbourhood */;  
       until  $k = k_{max}$ ;  
7    $t \leftarrow CpuTime()$   
   until  $t > t_{max}$ ;
```

Figura 10. Pseudo código del método VSN

Fuente: Ahmadi, Seifi y Tootooni (2015)

El resultado de este caso de estudio fue establecer 2 centros de distribución (DC) en el barrio Lafayette Park y el barrio Cathedral Hill. Cada uno de estos centros atendería una demanda de 124 500 kilogramos y 155 500 kilogramos, respectivamente. De esta manera se cumple con la restricción de capacidad de cada DC y el plan es distribuir la ayuda a los depósitos locales (LD) utilizando 2 y 3 vehículos, respectivamente.

### 1.4.3 Selección estratégica

El enfoque del planeamiento ha ido evolucionando a lo largo de la historia volviéndose más elaborado. En este sentido, se distinguieron tipologías contingenciales para estrategias de cambio dependiendo de la complejidad en el sistema técnico y en el conflicto en el sistema social (Trist, 1981). Cuando tanto la complejidad como el conflicto mencionados son altos, entonces la recomendación es un cambio no sinóptico de los sistemas, el cual tiene un foco normativo, busca cambios incrementales y se enfatiza en el proceso (Hostovsky, 2006). Esta tipología tiene algunos enfoques específicos que ayudarán con la planificación como lo es el enfoque de la selección estratégica que implica un análisis de áreas de decisión interrelacionadas (Friend y Hickling, 2012).

El primer paso para este análisis es determinar cuáles son las áreas de decisión relevantes y en cada una de estas tener opciones para escoger. Seguido de esto se deberá definir las áreas de comparación para evaluar qué opción podría ser preferible a otra, así como las incertidumbres identificadas en cada posible decisión. Al relacionar las áreas de decisión se puede priorizar las que tengan mayor relación entre sí para tenerlas como foco del análisis. El resultado de esto es un árbol de decisión con todas las opciones posibles y se podrán comparar uno contra uno tendiendo como base las áreas de comparación previamente definidas.

En este punto, las incertidumbres podrían dificultar el decidir si una decisión es mejor que otra. Para minimizar esto, se realiza una lista con compromisos o acuerdos para cada incertidumbre identificada con el fin que ya no sea un impedimento. Estas incertidumbres pueden ser sobre valores, sobre el ambiente operacional, o sobre decisiones relacionadas; para esto se recomienda un direccionamiento de las políticas, investigaciones, y conexiones, respectivamente (Friend y Hickling, 2012).

## CAPÍTULO 2. SITUACIÓN ACTUAL

En este capítulo se detallará cuál es el impacto de un probable movimiento sísmico de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao, así como los planes vigentes de acción ante este escenario.

### 2.1 Impacto telúrico en Lima Metropolitana y Callao

El impacto de un movimiento sísmico en una ciudad dependerá principalmente de dos factores: la calidad y tipo del suelo, y de la calidad y tipo de las viviendas. Esto puede verse magnificado más aún por el comportamiento que tengan los ciudadanos al momento del siniestro. En los siguientes puntos se tocarán estos factores y cómo afectarían a la capital en un terremoto.

#### 2.1.1 Factores topográficos

Lima Metropolitana y Callao se encuentran en la costa central de Perú, en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, frente al Océano Pacífico. Presenta 5 tipos de zonas geotécnicas sísmicas que indican el comportamiento de los suelos ante un sismo (PREDES, 2009). En la tabla 1 se resume cada una de estas zonas y en la figura 11 cómo están distribuidas estas zonas en Lima Metropolitana y Callao.

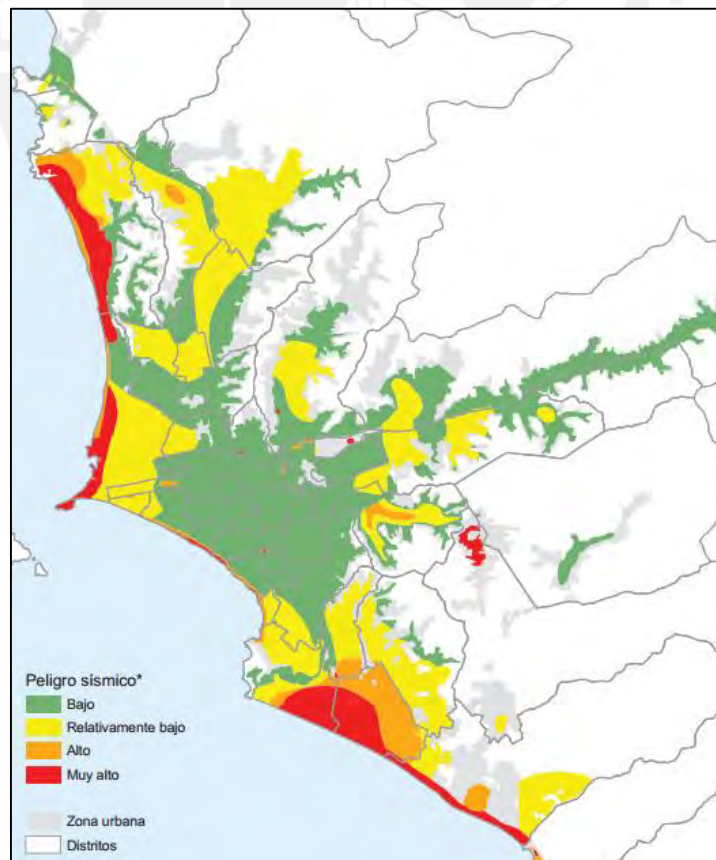


Figura 11. Zonas geotécnicas sísmicas en Lima

Fuente: PREDES (2009)

Tabla 1. Clasificación de los suelos por zonas

Zona	Descripción
Zona I (Peligro bajo)	Conformada por los afloramientos rocosos, los estratos de grava potentes que conforman los conos de deyección de los ríos Rímac y Chillón, y los estratos de grava coluvial-eluvial de los pies de las laderas, que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural determinados por las mediciones de microtrepidaciones que varían entre 0.1 y 0.3 s. Se considera que el factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo es $S=1.0$ y el periodo natural del suelo es $T_s=0.4$ s.
Zona II (Peligro medio)	Áreas de terreno conformado por un estrato superficial de suelos granulares finos y suelos arcillosos, cuyas potencias varían entre 3.0 y 10.0 m. Subyaciendo a estos estratos se encuentra la grava aluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes varían entre 0.3 y 0.5 s. Se considera que el factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo en esta zona es $S=1.2$ y el periodo natural del suelo es $T_s=0.6$ s.
Zona III (Peligro alto)	Conformada en su mayor parte por los depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se presentan en algunos sectores de los distritos de Puente Piedra, La Molina y Turín, y en los depósitos de arenas eólicas que cubren parte de los distritos de Ventanilla y Villa El Salvador, que se encuentran en estado suelto. Los periodos encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.7 s, con un factor de amplificación sísmica $S=1.4$ y un periodo natural de $T_s=0.9$ s.
Zona IV (Peligro muy alto)	Conformada por los depósitos de arenas eólicas de gran espesor y sueltas, depósitos marinos y suelos pantanosos que se ubican en la zona del litoral de los distritos de Ventanilla, Callao, Chorrillos, Villa El Salvador y Lurín, así como la zona de canteras de este material en el distrito de Pachacámac. En esta zona se ubica también el distrito de La Punta, cuyo perfil estratigráfico particular, con un estrato de grava superficial sobre un depósito potente de arcilla, genera periodos relativamente largos, y un sector del distrito de Pachacámac, cuyos depósitos profundos de arena generan periodos largos. Los periodos predominantes son mayores que 0.7 s, asignándoles un factor de amplificación sísmica $S=1.6$ y un periodo natural de $T_s=1.2$ s.
Zona V (Zonas puntuales)	Están constituidos por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos de desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado, con potencias entre 5.0 y 15.0 m. En esta zona se incluyen también a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y en la actualidad han sido urbanizados. Se mencionan las áreas que han sido identificadas en el presente estudio, las cuales se encuentran ubicadas en los distritos del Rímac, Surquillo, Bellavista, La Perla, San Juan de Miraflores y San Juan de Lurigancho, no descartándose la existencia de otras similares.

Fuente: PREDES (2009)

### 2.1.2 Vulnerabilidad sísmica en Lima Metropolitana y Callao

La vulnerabilidad sísmica territorial se entiende como el grado de resistencia que tiene una sociedad ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud y para determinar esto

se trabaja con un grupo de indicadores cuantitativos (PREDES, 2009). Estos indicadores se han agrupado de la siguiente manera:

Densidad poblacional: se obtiene promediando la cantidad de habitantes por hectárea en una zona determinada. Se considera una densidad baja si es de 70 a 150 habitantes por hectárea, y una zona tiene alta densidad cuando cuenta con más de 450 habitantes por hectárea.

Material de construcción predominante: Se consideran 4 tipos de materiales predominantes en las viviendas de Lima Metropolitana y Callao: ladrillo o bloque de cemento, predominante en la ciudad de Lima; adobe, predominante en las viviendas antiguas; madera, predominante en zonas de expansión urbana; y quincha o estera, existentes en menos medida en Lima.

Tipología constructiva de vivienda: Se consideran 4 tipologías de vivienda: casa independiente, departamento en edificio, quinta y vivienda improvisada. De manera general predominan las casas independientes; sin embargo, en los distritos centrales y modernos se concentra la mayor cantidad de viviendas del tipo departamento.

Estado de conservación de la vivienda: También se divide en 4 clases: deteriorada, en consolidación, densificada y consolidada. Del mismo modo que el indicador anterior, los distritos centrales concentran la tipología densificada por la cantidad de edificios que tiene.

Altura de la vivienda: Depende directamente del número de pisos que tiene una vivienda. Las de un solo piso se ubican principalmente en la periferia de Lima Metropolitana y Callao, mientras que los edificios de 4 a más pisos se ubican en distritos centrales.

Para cada uno de los indicadores se estima en nivel de vulnerabilidad. Los niveles con calificación de muy alto en cada indicador son: densidad media alta, material de adobe, vivienda improvisada, deteriorada o de 4 pisos a más. La calificación de alto se da para: densidad media, material de quincha, vivienda tipo quinta, en consolidación, o de 3 pisos. La calificación de medio se da cuando: densidad media baja, material de albañilería, edificio, tipología densificada o de 2 pisos. Finalmente, la calificación bajo es cuando: densidad baja, material de madera, casa independiente, consolidada y de 1 piso.

### 2.1.3 Escenario de riesgo sísmico

En Lima Metropolitana y Callao existe un silencio sísmico desde el terremoto de 1974 el cual ha ido almacenando energía la cual podría ser liberada con un gran sismo (Tavera y Heras, 2002). El evento sísmico máximo probable tiene las siguientes características (PREDES, 2009):



- Magnitud: 8,0 Mw
- Intensidades máximas: VIII escala Mercalli Modificada, entre Lima Metropolitana y Chimbote.
- Aceleraciones máximas promedio: 350 – 400 Gals (cm/s<sup>2</sup>)
- Epicentro: frente a Lima.
- Hipocentro profundidad: 33 km.

Extensión afectada: para este estudio se presupone efectos destructivos restringidos solo a Lima Metropolitana y la Provincia Constitucional del Callao. Sin embargo, un evento real afectaría a los departamentos de Lima, Ancash, Ica, Huánuco, Junín, Pasco y Huancavelica.

El riesgo sísmico es la combinación del peligro sísmico, producto de los factores topográficos, y de la vulnerabilidad de la sociedad (SINADECI, 2004). En la figura 12 se ilustra cómo sería el impacto de este sismo en Lima Metropolitana y Callao. Los distritos más críticos son los que se encuentran pintados de rojo pues son más vulnerables ante un sismo de gran magnitud en la capital. Los distritos en color verde son los que presentan menor vulnerabilidad. La tabla 2 resume estos efectos según el nivel de riesgo y la descripción del daño que causaría.

Tabla 2. Daño por tipo de riesgo

Nivel de riesgo	Relación de daño	Daño estructural	Daño no estructural	Descripción del estado de daño
Bajo	0.01% - 15%	Ninguno	Localizado	Daño no estructural puntual (grietas en muros y tabiques), posible daño en componentes mecánicos y eléctricos. Costo de reparación menor al 15% del valor de mercado.
Moderado	15% - 30%	Ligero	Moderado Extensivo	Daño estructural ligero y no estructural considerable, costo de reparación menor al 30% del valor de mercado.
Alto	30% - 60%	Considerable	Cercano al total	Daño estructural considerable y no estructural excesivo. Se requiere reparar o reemplazar muchos elementos estructurales. El edificio se desaloja durante la reparación.
Muy alto	60% - 100%	Grave	Grave Colapso	Edificio declarado en ruina. Más económico demoler que reparar. Posible colapso total en terremoto o futuras réplicas.

Fuente: PREDES (2009)

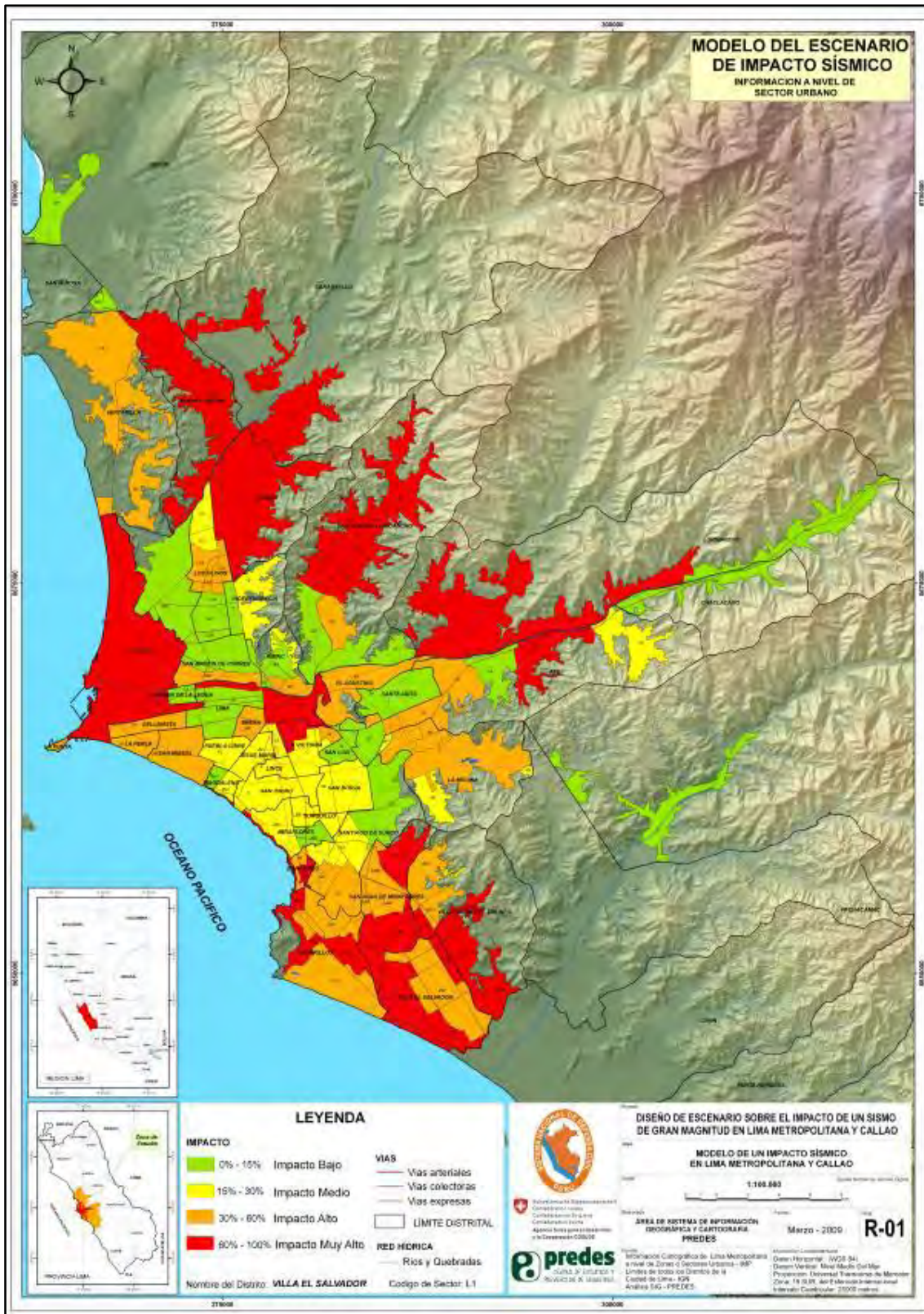


Figura 12. Zonas más vulnerables en Lima

Fuente: PREDES (2009)

## 2.2 Medidas de contingencia actuales

El Estado peruano tiene presente el constante peligro sísmico con el que convive el país. Por eso tiene un grupo de entidades responsables y planes elaborados para prevenir y responder ante posibles desastres. En esta sección se detallan estos planes y se hace un diagnóstico preliminar de cómo esto se aplica en la realidad.

### 2.2.1 Planes vigentes

El ente estatal dedicado a la prevención y atención de desastres en Perú es el Sistema Nacional de Defensa Civil (SINADECI) creado a inicio de los años 70. Es un conjunto organizado de entidades públicas y privadas regida por el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y sus direcciones regionales (SINADECI, 2004). Defensa Civil cuenta con cuatro tipos de planes mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Tipos planes de Defensa Civil

Plan	Descripción
Plan de Prevención y Atención de Desastres	Es un plan estratégico de largo plazo que en consideración a la Política de Prevención y Atención de Desastres en el nivel correspondiente define los objetivos, estrategias y programas que orientan las actividades institucionales y/o interinstitucionales para la prevención, reducción de riesgos, los preparativos para la reducción de emergencias y la rehabilitación en casos de desastres, permitiendo reducir los daños, víctimas y pérdidas que podrían ocurrir a consecuencia de un fenómeno natural o generado por el hombre potencialmente dañino. Se emite a nivel Nacional, Sectorial, Regional, Provincial y Distrital.
Plan de Operaciones de Emergencia	Es un Plan Operativo que organiza la preparación y la respuesta a la emergencia, considerando los riesgos del área bajo su responsabilidad y los medios disponibles en el momento. Este plan es evaluado periódicamente mediante simulaciones y simulacros. Se emite a nivel Nacional, Sectorial, Regional, Provincial y Distrital.
Plan de Contingencia	Son los procedimientos específicos preestablecidos de coordinación, alerta, movilización y respuesta ante la ocurrencia o inminencia de un evento particular para el cual se tiene escenarios definidos. Por lo señalado, tiene carácter opcional cuando se presuman las condiciones indicadas. Se emite a nivel Nacional, Sectorial, Regional, Provincial y Distrital.
Plan de Seguridad en Defensa Civil	Es el conjunto de acciones destinadas a organizar la seguridad, preparar, controlar y mitigar los efectos dañinos de la ocurrencia de un fenómeno natural o antrópico que se pueda manifestar en un recinto o instalación con la finalidad de evitar o reducir los posibles daños a la vida humana, al medio ambiente y al patrimonio. Deberá contener el Plan de Evacuación y cuando corresponda el o los Planes de Contingencia necesarios. Adicionalmente, podrá incluir los planes de protección patrimonial, prevención de accidentes, prevención y control de incendios, entre otros, que tengan como eje la prevención de riesgos y siniestros

Fuente: SINADECI (2004)

En esta línea, se tiene actividades específicas para gestionar el riesgo de desastres. De manera general se tienen los siguientes procesos resumidos en la tabla 4.

Tabla 4. Tipos de procesos para la gestión del riesgo

Proceso	Descripción
Estimación del riesgo	Acciones y procedimientos que se realizan para generar el conocimiento de los peligros o amenazas, analizar la vulnerabilidad y establecer los niveles de riesgo que permitan la toma de decisiones en la gestión del riesgo de desastres.
Prevención y Reducción del riesgo	Acciones que se orientan a evitar la generación de nuevos riesgos en la sociedad y a reducir las vulnerabilidades y riesgos existentes en el contexto de la gestión del desarrollo sostenible.
Preparación, Respuesta y Rehabilitación	Acciones que se realizan con el fin de procurar una óptima respuesta de la sociedad en caso de desastres, garantizando una adecuada y oportuna atención de personas afectadas, así como la rehabilitación de los servicios básicos indispensables; permitiendo normalizar las actividades en la zona afectada por el desastre.
Reconstrucción	Acciones que se realizan para establecer condiciones sostenibles de desarrollo en las áreas afectadas, reduciendo el riesgo anterior al desastre y asegurando la recuperación física, económica y social de las comunidades afectadas.

Fuente: INDECI (2011)

Un plan de operaciones de emergencia tiene como base la situación actual y con esto define una manera efectiva de manejar las situaciones de desastre. Utiliza planes de contingencia como respuesta que también incluye protocolos que establecen de manera explícita las responsabilidades de las entidades encargadas (SINADECI, 2004). Según este plan, los principios que orientan el manejo de desastres en Lima Metropolitana y Callao son:

- Coordinación y responsabilidad
- Protección de la sociedad
- Respuesta escalonada
- Solidaridad social
- Precaución
- Primacía del interés colectivo

Las fases operativas del POE son: preparación, respuesta y rehabilitación; siendo la respuesta una de las críticas debido a la urgencia y la velocidad con la que se tiene que acudir. Esta fase de respuesta está dividida en 6 áreas funcionales y cada una de estas áreas tiene un conjunto de actividades asignado. A continuación se muestra esta división por áreas y sus respectivas actividades según el POE (INDECI, 2011).

## 1. Rescate y seguridad

- 1.1 Búsqueda y Rescate.
- 1.2 Medidas de seguridad y de tránsito.
- 1.3 Control de incendios.
- 1.4 Evacuación masiva de zonas afectadas y en riesgo.
- 1.5 Emergencias de materiales peligrosos.

## 2. Salud

- 2.1 Atención pre hospitalaria.
- 2.2 Atención hospitalaria.
- 2.3 Vigilancia epidemiológica post-desastre.
- 2.4 Salud ambiental.
- 2.5 Manejo de cadáveres.
- 2.6 Salud Mental.

## 3. Asistencia humanitaria

- 3.1 Empadronamiento.
- 3.2 Techo de emergencia en lote.
- 3.3 Instalación y manejo de albergues.
- 3.4 Asistencia alimentaria.
- 3.5 Asistencia no alimentaria.
- 3.6 Dotación de agua temporal.
- 3.7 Protección de grupos vulnerables.
- 3.8 Reunificación familiar.

## 4. Servicios generales, hábitat y medio ambiente

- 4.1 Monitoreo de eventos naturales y/o inducidos, y riesgos concatenados.
- 4.2 Evaluación de daños y restablecimiento de servicios de transporte y comunicaciones.
- 4.3 Evaluación de daños y restablecimiento de servicios de agua y saneamiento.
- 4.4 Evaluación de daños y restablecimiento de servicios de energía.
- 4.5 Evaluación de daños en edificaciones públicas y privadas.
- 4.6 Estabilización y/o demolición de estructuras, remoción y manejo de escombros.
- 4.7 Evaluación de daños y restablecimiento de servicios de educación.

## 5. Dirección y manejo de la emergencia

- 5.1 Planificación integral y coordinación de la emergencia.
- 5.2 Información pública.
- 5.3 Asuntos legales y administrativos.
- 5.4 Coordinación de la evaluación de daños y análisis de necesidades – EDAN.
- 5.5 Gestión de información y comunicaciones del COE.
- 5.6 Coordinación de la cooperación internacional.
- 5.7 Coordinación con otras regiones y el sector privado.
- 5.8 Planificación de la recuperación económica y social.

**6. Logística y recursos para las operaciones y toma de decisiones**

- 6.1 Inventario de recursos y análisis de necesidades logísticas.
- 6.2 Administración de almacenes.
- 6.3 Manejo de donaciones.
- 6.4 Manejo de recursos (personal, equipos, instalaciones, materiales).
- 6.5 Coordinación y manejo de medios de transporte (movilidad).
- 6.6 Manejo de la seguridad ocupacional y servicios a los respondientes (salud alimentos y otros).

Un punto importante es el área de asistencia humanitaria pues brinda la ayuda inmediata a la población damnificada por el desastre. Se cuentan con bienes de ayuda humanitaria guardados en almacenes a nivel nacional. La jerarquía que se maneja es la siguiente: los almacenes nacionales abastecen a los almacenes regionales, estos abastecen a los almacenes adelantados y, finalmente, desde los almacenes adelantados se distribuye la ayuda a los damnificados (INDECI, 2011). Se tiene en total 12 almacenes nacionales, 25 regionales y 138 adelantados. En la figura 13 se ilustra la distribución de los almacenes adelantados en Perú.

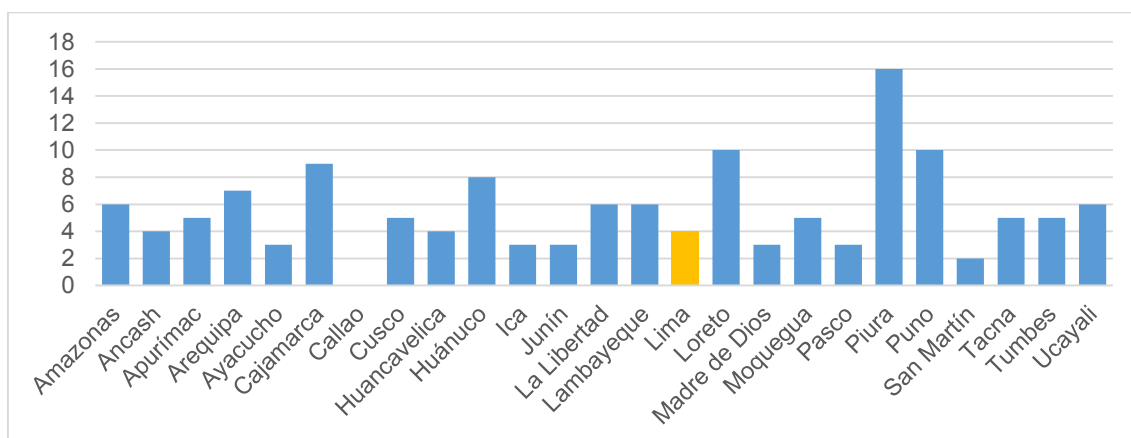


Figura 13. Cantidad de almacenes adelantados por región

Fuente: INDECI (2011)

La principal razón por la cual no se tienen igual cantidad de almacenes en cada región es porque se basan en la frecuencia de desastres. Por ejemplo, en Piura se tienen casos cada año de lluvias fuertes o inundaciones por desborde de ríos; mientras que en regiones como Lima pocas veces se tiene algún desastre de origen natural. Sin embargo, de existir un desastre de gran magnitud, al tener tanta población concentrada en Lima Metropolitana y Callao, sería necesaria una mayor cantidad de almacenes de ayuda humanitaria.

### 2.2.2 Caso terremoto en Pisco, 2007

Un caso que se puede tomar como ejemplo en un departamento vecino a Lima es el sismo de Pisco en 2007. El 15 de agosto de 2007, a las 6:04 p.m. hora local, se registró un sismo de magnitud 8 Mw en la costa sur de Perú (INDECI, 2011). La figura 14 ilustra las áreas afectadas por el sismo en términos de viviendas dañadas o destruidas.

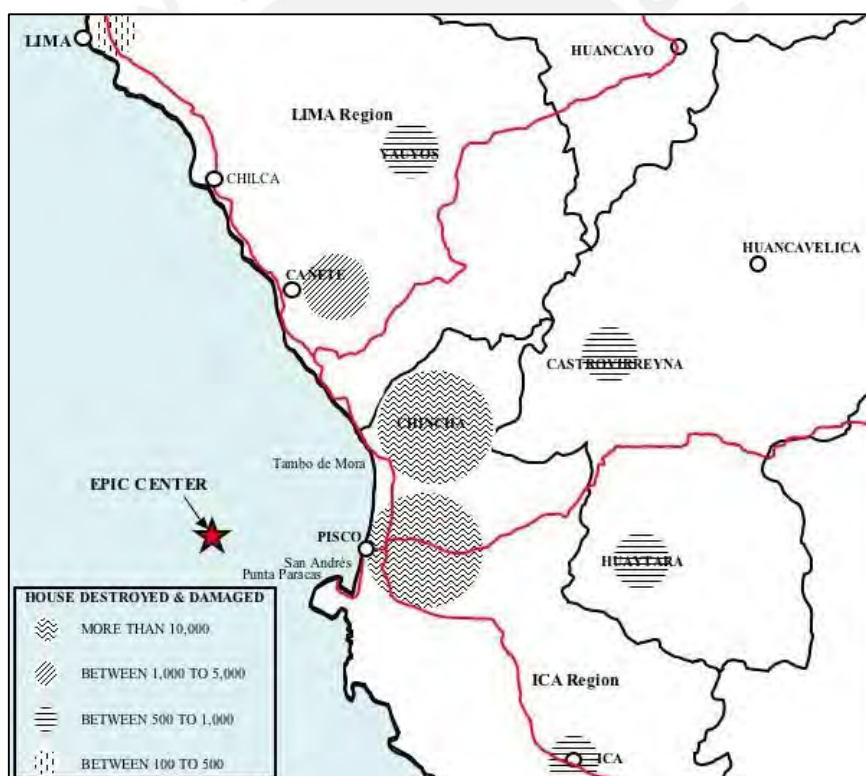


Figura 14. Áreas afectadas por el terremoto

Fuente: Tang y Johansson (2010)

En la publicación de Tang y Johansson (2010) detalla cuál fue el impacto social de este sismo y la respuesta de emergencia que se tuvo para el mismo. Se registraron 519 muertes y más de 1,300 heridos causados por este terremoto. Además del daño de la carretera que conduce al área del terremoto, la falla del sistema de telecomunicaciones

causó demoras en la respuesta y el esfuerzo de rescate. INDECI, las ONG y el apoyo internacional estaban disponibles para proporcionar los servicios de rescate y limpieza necesarios, incluida la construcción de albergues temporales para las víctimas desplazadas de las casas dañadas. A pesar de sus esfuerzos, las organizaciones a cargo de la respuesta a los desastres quedaron abrumadas por la magnitud del daño, lo que provocó la remoción lenta de escombros, pocas casas temporales y tiendas de campaña, y malas condiciones en los campos de refugiados.

Como se indicó en la figura 13, Ica cuenta con 3 almacenes adelantados de ayuda humanitaria y se evidenció que no resultó suficiente. En el caso de Lima, los almacenes se encuentran fuera de Lima Metropolitana (INDECI, 2011), por lo que también es un riesgo el que no se puedan distribuir correctamente por grietas en la carretera como sucedió tras el terremoto de 2007 como se puede observar en la figura 14.



Figura 14. Impacto en la carretera Panamericana Sur

Fuente: Tang y Johansson (2010)

La coordinación es otro punto importante, ya que se puede contar con mucha ayuda humanitaria, pero no canalizarla correctamente puede resultar en demoras al distribuirla. Esto es un punto a favor a establecer los almacenes adelantados como centros de transbordo entre las organizaciones donantes y la población damnificada.



## CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE MEJORA

En este capítulo se describirá la metodología propuesta ante el problema planteado tanto para la ubicación de almacenes fijos o permanentes, y los almacenes temporales.

### 3.1 Metodología del modelo propuesto

En este punto se desarrollará un análisis del problema abordándolo desde un enfoque de selección estratégica para luego presentar la metodología que se divide en 2 fases: antes del sismo, y después del mismo.

#### 3.1.1 Aproximación con enfoque de selección estratégica

Para tener un buen indicio de cómo abordar el problema de la velocidad de respuesta es importante tener en cuenta el ámbito técnico, como lo son los modelos de optimización, pero también factores sociales pues es una decisión que influirá en la población. La complejidad en el sistema técnico y en el conflicto en el sistema social son altos en este caso, por lo que se sugiere tomarlo como un planeamiento de cambio no sinóptico de los sistemas (Hostovsky, 2006).

En este sentido, se deberá optar por un enfoque de selección estratégica para escoger que decisión tomar. Como primera etapa tenemos el definir cuáles serán las áreas de decisión relevantes para la ubicación de almacenes de ayuda humanitaria. Se decidió contar con ubicación, alianzas estratégicas, responsabilidad del almacén, tamaño de almacén, tipo de ayuda, tipo de colaboradores, financiamiento y origen de la ayuda.

##### Cantidad de almacenes

La decisión de la cantidad de almacenes se abordará de manera macro en 3 opciones: tener solo un almacén central, tener un almacén por cada distrito, o tener un almacén por cada grupo de distritos.

##### Alianzas estratégicas

En este punto se pueden realizar alianzas con la Municipalidad de Lima, con las municipalidades distritales, con empresas privadas y ayuda externa, con el fin de recibir donaciones, ayuda en la administración y distribución de la ayuda.

##### Tipo de Almacén

Para la construcción del almacén se definieron tres tamaños: De material noble y grandes proporciones, material noble y pequeño, armado en el momento y pequeño.

### Responsabilidad del almacén

Se propone que entidad será responsable de administrar estos almacenes.

### Tipo de ayuda

La ayuda que se espera distribuir a los afectados por el sismo consiste en alimentos, agua, ropa entre otros.

### Tipo de colaborador

Para la etapa de distribución en caso de desastre el personal puede ser propio de los almacenes o personas voluntarias con el ánimo de ayudar.

### Financiamiento

La construcción y la administración del almacén se puede financiar de tres maneras, a través de donaciones, mediante presupuesto INDECI o por el presupuesto de las Municipalidades.

### Origen de la ayuda

La ayuda puede provenir del interior o exterior del país mediante donaciones de algunas instituciones ONG.

Luego de esta etapa, se definen las áreas de comparación para evaluar qué opción podría ser preferible ante otra. Estas áreas son la cobertura de los almacenes de ayuda, para poder llegar a más damnificados; velocidad en el tiempo de respuesta, para cumplir con el objetivo de apoyar lo más rápido posible y, finalmente, el costo de la propuesta.

### Cobertura

Para esta área se tomó en cuenta colocar el almacén en un punto tal que se pueda cubrir la mayor cantidad de damnificados por zonas definidas.

### Velocidad de respuesta

La logística es muy importante en este punto, dado que se tiene que cumplir con ayudar a la mayor cantidad de afectos en un menor tiempo.

### Costo de Inversión

El costo de inversión define si es viable la construcción del almacén. Se estima que tan costoso es la construcción del almacén dependiendo de la ubicación y tamaño de este.

Como tercera etapa es identificar la incertidumbre de cada una de las posibles decisiones. Se han identificado las siguientes como más importantes:

- Resistencia sísmica del almacén
- Estabilidad de partidas presupuestales
- Medios de comunicación post sismo
- Estado de las vías terrestres
- Eficiencia del reparto
- Estado de las donaciones
- Suficiencia del stock de bienes
- Aceptación del almacén en la comunidad
- Simultaneidad de sismos en la región

Las áreas de decisión están relacionadas entre sí, algunas en mayor medida que otras. En el siguiente gráfico se ilustran estas relaciones, que indica si una decisión tiene repercusión sobre otra. El área que tiene más relaciones es el de alianzas estratégicas con cuatro otras áreas. En segundo lugar se tienen tres áreas que son: Cantidad, Financiamiento y el tipo de los almacenes. Cada una de estas áreas tiene tres vínculos con otras áreas por lo que también son de importancia.

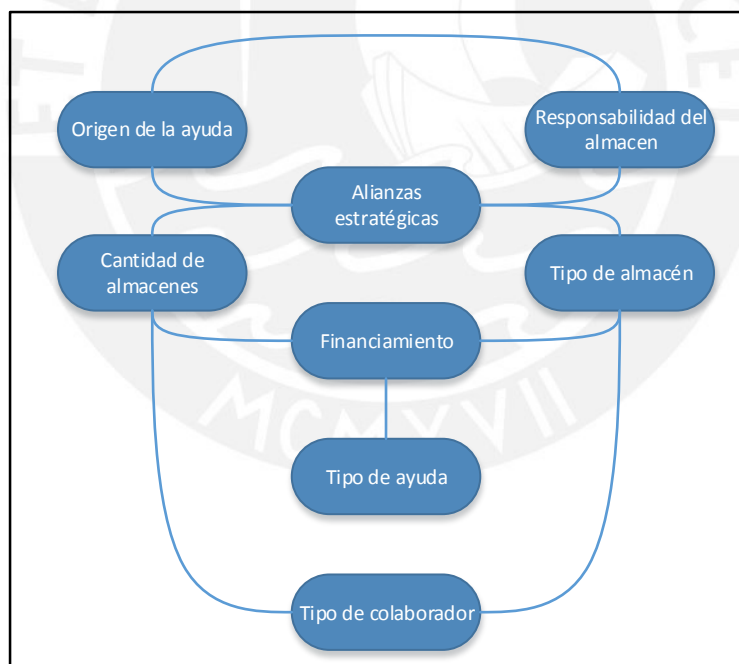


Figura 16. Vínculos entre las áreas de decisión

Bajo este análisis se decidió considerar las cuatro áreas con más vinculación para que sea el foco del problema, pues al definir estas decisiones influirá de manera directa a las áreas vinculadas. En el siguiente gráfico se muestra este foco.

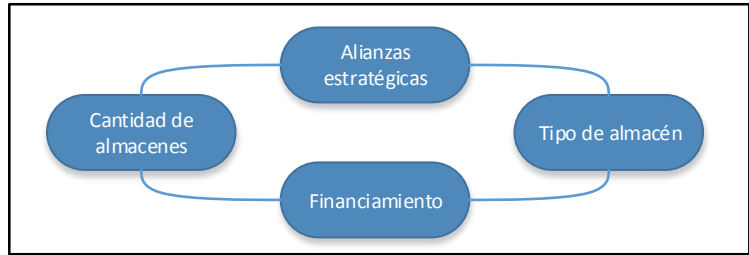


Figura 17. Áreas de decisión escogidas como foco

Con estos parámetros se determinó un esquema estilo árbol de decisión en el cual se muestran todas las decisiones posibles. En la tabla 5 se muestra cómo se despliega este esquema para la opción de tener un almacén central único.

Tabla 5 – Esquema de decisiones posibles para almacén único central

Cantidad	Tipo	Alianza	Financiamiento
Almacén central único	Fijo y grande	Municipalidad	Donaciones
			Presupuesto INDECI
			Presupuesto municipalidad
		Empresas	Donaciones
			Presupuesto INDECI
			Presupuesto municipalidad
		Externo	Donaciones
			Presupuesto INDECI
			Presupuesto municipalidad
	Fijo y pequeño	Municipalidad	Donaciones
			Presupuesto INDECI
			Presupuesto municipalidad
		Empresas	Donaciones
			Presupuesto INDECI
			Presupuesto municipalidad
		Externo	Donaciones
			Presupuesto INDECI
			Presupuesto municipalidad
Temporal y pequeño	Municipalidad	Donaciones	
		Presupuesto INDECI	
		Presupuesto municipalidad	
	Empresas	Donaciones	
		Presupuesto INDECI	
		Presupuesto municipalidad	
	Externo	Donaciones	
		Presupuesto INDECI	
		Presupuesto municipalidad	

Con todo lo definido en el punto anterior, se tienen algunas combinaciones de decisión que son claramente mejores que otras; sin embargo, hay otras que no se puede dar una respuesta con tal certeza pues aún existen incertidumbres. Por ejemplo, en la figura 18

se compara la decisión 1 versus la decisión 9 y se puede apreciar que este caso, todos los puntos se inclinan a la derecha, dándole ventaja la decisión 9.

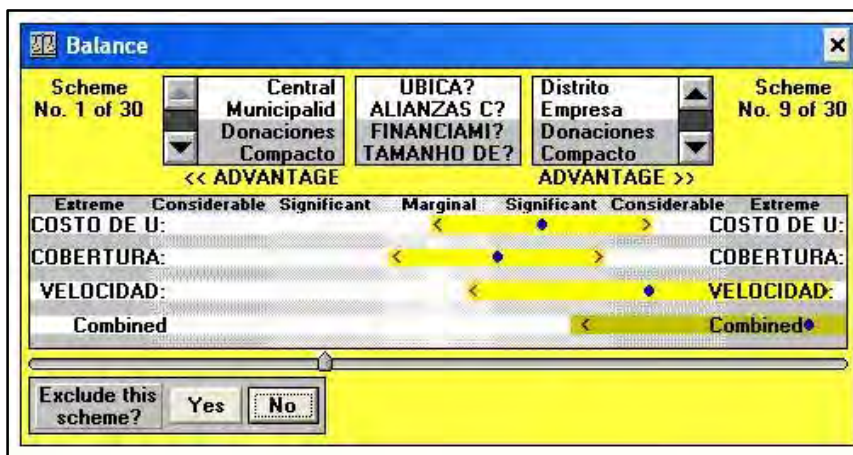


Figura 19. Balance de decisiones

Para poder reducir las incertidumbres y tomar mejor las decisiones se establecen compromisos o acuerdos como los siguientes:

- Resistencia sísmica del almacén - Contar con mano de obra, directa e indirecta, calificada y materiales de calidad
- Estabilidad de partidas presupuestales - Tener disponibilidad permanente de una partida para construcción y mantenimiento de la infraestructura.
- Medios de comunicación - Tener la habilitación de puntos de red y telefonía móvil o fija o la posibilidad de construir sobre las existentes sin saturarlas.
- Estado de las vías terrestres - Identificar las vías alternas para el acceso desde y hacia el Almacén en caso las vías principales estén bloqueadas.
- Eficiencia del reparto - Contar con el personal idóneo para realizar este tipo de trabajo, teniendo en cuenta la honestidad, honradez y compromiso de la persona.
- Estado de las donaciones - Diseñar el almacén de modo que garantice los adecuados equipos para el cuidado de medicinas y alimentos, así como la accesibilidad a los mismos.
- Suficiencia del stock de bienes - Calcular la población vulnerable y proyectarla a fin de contar con un local que pueda satisfacer adecuadamente la totalidad de necesidades básica de dicha población.
- Aceptación del almacén en la comunidad - Realizar juntas vecinales para explicar la importancia de la construcción y mantenimiento un centro de acopio o almacén y realizar campañas de concientización.
- Simultaneidad de sismos en la región - Diversificar las fuentes de ayuda.

De manera general, con este análisis de enfoque en la estrategia logramos tener un panorama más claro de las posibles decisiones que se podría tomar para resolver el problema. Como se tienen incertidumbres aún no se tendría la certeza para escoger una decisión; sin embargo, se ha definido ya en los compromisos y progreso las actividades qué hacer para reducir las incertidumbres y poder tomar una mejor decisión. La decisión que tendría mayor ventaja es la de realizar almacenes temporales por clústeres, y que sea administrado por INDECI.

### 3.1.2 Fases en la metodología

La propuesta para la minimización del impacto social ante un sismo se dividirá en dos etapas. La primera será *a priori* y tiene como entregable la cantidad así como la ubicación de almacenes “fijos”, es decir construidos de material noble y los cuales contarán con un *stock* permanente de bienes de ayuda humanitaria. La segunda etapa se calculará una vez ocurrido el sismo de gran magnitud y se tenga información sobre la cantidad de damnificados, dónde se concentran y las vías que se encuentren bloqueadas. El entregable de esta segunda etapa será la localización y cantidad de almacenes temporales de la red de distribución, así como las rutas de reparto considerando las vías bloqueadas. En la figura 19 se ilustra cada una de estas fases.

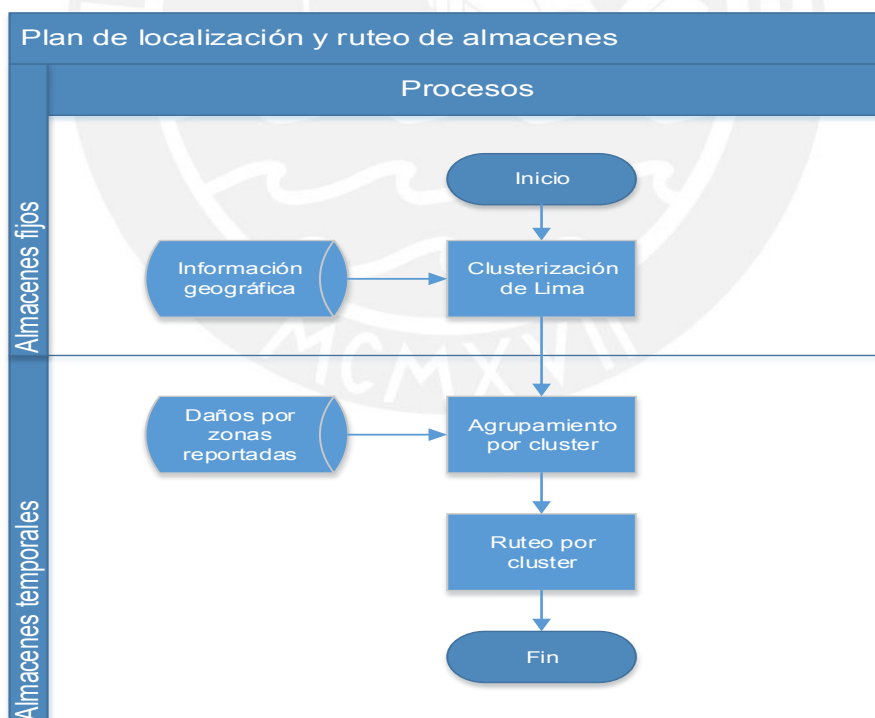


Figura 19. Fases de la metodología propuesta

## 3.2 Cantidad y ubicación de almacenes fijos

En esta primera etapa se determinará cuántos almacenes permanentes deberán implementarse para tener una buena cobertura y rapidez de respuesta. Luego, se determinará dónde se ubicarán y a qué zonas atenderá.

### 3.2.1 Determinación del número de almacenes fijos

Según INEI, Lima Metropolitana y Callao tienen un total de 49 distritos sumando 2 800 kilómetros cuadrados de superficie, casi 10 millones de habitantes en poco menos de 2 millones de viviendas. En la tabla 6-1 y 6-2 se muestran los principales atributos de cada distrito en cuanto a superficie, población, y número de viviendas y se puede concluir que los distritos son muy heterogéneos.

Tabla 6-1. Principales atributos de los distritos limeños

Distrito	Superficie (km)	Población 2015	Viviendas
Ancón	298.64	43,382	8,236
Ate	77.72	630,086	108,849
Barranco	3.33	29,984	9,440
Bellavista	4.56	71,833	16,444
Breña	3.22	75,925	21,668
Callao	45.65	406,889	87,668
Carabaylo	346.88	301,978	46,933
Carmen de la Legua	2.12	41,100	8,572
Chaclacayo	39.50	43,428	9,166
Chorrillos	38.94	325,547	62,408
Cieneguilla	240.33	47,080	4,569
Comas	48.75	524,894	95,036
El Agustino	12.54	191,365	36,434
Independencia	14.56	216,822	41,239
Jesús María	4.57	71,589	18,234
La Molina	65.75	171,646	32,945
La Perla	2.75	58,817	13,887
La Punta	0.75	3,392	1,237
La Victoria	8.74	171,779	49,007
Lima	21.98	271,814	75,418
Lince	3.03	50,228	15,701
Los Olivos	18.25	371,229	73,722
Lurigancho	236.47	218,976	38,756
Lurín	180.26	85,132	14,562
Magdalena del Mar	3.61	54,656	13,735

Fuente: INEI

Un solo almacén probablemente no se dé abasto para la totalidad de damnificados en Lima Metropolitana y Callao por capacidad y tendría que recorrer grandes distancias para la entrega de bienes aun así esté situado en el centroide de la capital.

Tabla 6-2. Principales atributos de los distritos limeños

Distrito	Superficie (km)	Población 2015	Viviendas
Miraflores	9.62	81,932	27,913
Pachacámac	160.23	129,653	17,403
Pucusana	37.39	17,044	2,799
Pueblo Libre	4.38	76,114	19,562
Puente Piedra	71.18	353,327	51,150
Punta Hermosa	119.50	7,609	1,767
Punta Negra	130.50	7,934	1,415
Rímac	11.87	164,911	41,243
San Bartolo	45.01	7,699	1,545
San Borja	9.96	111,928	28,269
San Isidro	11.10	54,206	17,860
San Juan de Lurigancho	131.25	1,091,303	189,671
San Juan de Miraflores	23.98	404,001	69,942
San Luis	3.49	57,600	13,347
San Martín de Porres	36.91	700,177	123,863
San Miguel	10.72	135,506	32,871
Santa Anita	10.69	228,422	39,709
Santa María del Mar	9.81	1,608	76
Santa Rosa	21.50	18,751	2,963
Santiago de Surco	34.75	344,242	75,164
Surquillo	3.46	91,346	23,671
Ventanilla	73.52	428,284	70,874
Villa El Salvador	35.46	463,014	75,883
Villa María del Triunfo	70.57	448,545	83,947

Fuente: INDECI

La estrategia para este caso será generar nodos equidistantes por todo Lima Metropolitana y Callao, asignando a cada uno información de la longitud y latitud de su ubicación. Lo que se quiere priorizar es que la extensión territorial atendida sea uniforme entre clústeres y que los nodos sean cercanos al almacén. Por este motivo se utilizará la herramienta de clusterización de k-medias. Para determinar cuál será el k idóneo se evaluará la suma de cuadrados de las distancias entre los nodos y el almacén asignado. Se espera que conforme el k vaya incrementando, este indicador se hará cada vez menor; sin embargo, llegará un punto en que esta reducción ya no será significativa y se escogerá el k anterior.

### 3.2.2 Ubicación de los almacenes fijos

Se ejecutará el algoritmo de k-medias utilizando el k escogido en el punto anterior y con esto se obtendrá la ubicación de cada uno de los almacenes. Además, se obtiene un atributo adicional en cada nodo que indica a qué almacén fijo está asignado. El código de los programados se detallará en el capítulo 4.



### 3.3 Cantidad y ubicación de almacenes temporales y ruteo

En esta segunda etapa se determinará cuántos almacenes temporales deberán implementarse, luego de ocurrido el sismo, para tener una buena cobertura y rapidez de respuesta. Luego, se determinará dónde se ubicarán y a qué zonas atenderá con un plan de la ruta que deberían tomar.

#### 3.3.1 Estrategia de información de daños

La información para esta segunda fase se obtendrá inmediatamente luego de haber ocurrido el sismo y con esto se determinará la cantidad y ubicación de almacenes temporales. Sin embargo, actualmente la recolección de información sobre los daños y damnificados se hace mediando un empadronamiento que podría dilatarse y no cumplir con la meta de las 72 horas. Por este motivo se propone una alternativa para tener en tiempo real información aproximada sobre la criticidad del sismo por zonas.

Como parte de las tareas de prevención de sismos escoger por cuadrante a un representante de cuadrante (nodo). Su rol será de mandar un mensaje de texto (SMS) a la central de INDECI indicando qué tan dañado está su cuadrante asignado con una escala del 1 al 5, donde 1 es leve y 5 es muy grave; además, si una zona quedó sin ningún daño reportará un cero y se omitirá del análisis. Se escogió ese medio porque las llamadas y los datos de internet tienen más riesgo de colapsar.

#### 3.3.2 Propuesta de clústeres para los almacenes temporales

Con base en la información recolectada vía SMS se le asignará un peso a cada cuadrante (nodo) de cada clúster. Previamente ya se tendrá cargada la información de distancia entre nodos, así como la distancia del almacén fijo a cada nodo. Para determinar la ubicación de cada almacén temporal y sus nodos asignados se ejecutará el siguiente modelo de programación lineal.

**Parámetros:**

$Demanda_i$  = Peso asignado al nodo con valores del 1 al 5

$Distancia_{i,j}$  = Distancia entre los nodos  $i$  y  $j$

$Lejanía_i$  = Distancia del almacén fijo a cada nodo  $i$

$Cobertura$  = Cuánto peso puede cubrir un almacén temporal

**Variables de decisión:**

$x_{ij}$  = Decisión cubrir el nodo  $j$  desde el almacén temporal  $i$

$y_i$  = Decisión de abrir un almacén temporal en el nodo  $i$

Función objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{Distancia}_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} \text{Lejanía}_i y_i \quad (51)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq M y_i \quad \forall i \in I \quad (52)$$

$$\sum_{j \in J} \text{Demanda}_j x_{ij} \leq \text{Cobertura} y_i \quad \forall i \in I \quad (53)$$

$$\sum_{j \in J} \text{Demanda}_j x_{ij} \geq \text{MinCap} y_i \quad \forall i \in I \quad (54)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \geq 1 \quad \forall j \in J \quad (55)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (56)$$

$$y_i \in \{0; 1\} \quad \forall i \in I \quad (57)$$

La función objetivo (51) buscará minimizar la distancia de los nodos a los almacenes temporales, así como la distancia de los almacenes temporales al almacén fijo. Las restricciones (52) y (53) indican la lógica de activar un almacén temporal siempre y cuando tenga demanda asignada y también limita la cobertura máxima, mientras que la restricción (54) restringe una capacidad mínima del almacén temporal. La restricción (55) garantiza que se visite cada nodo para que se atienda la demanda, y las restricciones (56) y (57) define a las variables como binarias.

### 3.3.3 Propuesta de rutas para la distribución

La siguiente etapa toma como data de entrada la cantidad y ubicación de almacenes temporales y busca generar rutas para que el almacén fijo los abastezca continuamente. Se ejecutará un problema de ruteo de vehículos (VRP) descrito en el punto 1.1.1 teniendo 4 parámetros que se modificarán dependiendo del caso.

- Distancia entre nodos – Se modificará siempre y cuando alguna ruta la hayan reportado bloqueada y se colocará un valor muy alto para penalizarlo.
- Demanda – Es la escala del 1 al 5 que envían los líderes de cuadrante que indicará cuánta ayuda necesita una zona.

- Capacidad – Cuántos kits de ayuda puede transportar una unidad para abastecer la demanda mencionada anteriormente. Dependerá de lo que se esté repartiendo.
- Vehículos – Cantidad de vehículos disponibles por clúster.

La cantidad de viajes que realicen los vehículos en cada clúster dependerá de la gravedad del sismo así como de la velocidad de rotación de los bienes de ayuda humanitaria.

#### 3.3.4 Gestión del tiempo en la propuesta

Esta segunda etapa inicia luego de ocurrido el sismo y finaliza cuando la población damnificada ya ha sido atendida. Para que sea un éxito se deberá controlar los tiempos que tome cada actividad involucrada. A continuación se detalla cada una de las actividades que se deberán realizar tras el movimiento sísmico.

##### Recolección de la información

Minutos después de ocurrido el sismo, el responsable de zona tiene la tarea de mandar un SMS indicando la severidad en la población asignada en una escala del 1 al 5. Esto debería finalizar media hora luego de ocurrido el terremoto.

##### Procesamiento de la información

Todos los SMS recibidos por INDECI serán consolidados en una base de datos y serán asignados a cada nodo generado para tener un aproximado de la población damnificada.

##### Ejecución de modelos matemáticos

Se ejecutará el modelo descrito en el punto 3.3.2 y con esto se obtiene la cantidad de almacenes temporales necesarios y su ubicación. Seguido de esto se ejecuta el modelo de ruteo de vehículos descrito en el punto 3.3.3.

##### Habilitación de almacenes temporales

Con base en la cantidad y ubicación de almacenes temporales se enviarán equipos para habilitarlos donde correspondan. Estos equipos tendrán la tarea de recibir los bienes de ayuda humanitaria, así como despacharlos.

##### Abastecimiento continuo de bienes de ayuda

La dinámica será que el almacén fijo del clúster reparta a pedido los bienes de ayuda humanitaria que el almacén temporal solicite. Además, de haber ayuda externa se deberá canalizar por el almacén fijo de cada clúster.

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos al ejecutar la metodología propuesta en el capítulo 3. Los programas empleados son R en su versión 3.4.2, Rstudio en su versión 1.1.383 y AMPL versión completa empleando el solver CPLEX versión 12. Primero se muestra la fase previa al sismo en la que se determina la cantidad y ubicación de almacenes fijos, así como sus clústeres asignados, para luego evaluar la segunda fase en la que se calculan los almacenes temporales.

### 4.1 Fase 1: Almacenes fijos

Como primer paso se generaron nodos equidistantes cubriendo la geografía de Lima Metropolitana y Callao. Para realizar esto, se realizaron los pasos mostrados en la tabla 7 en el programa RStudio. Este script permite generar nodos y seleccionar solo los que estén dentro del contorno de Lima y Callao. En la figura 20 se muestra el contorno de Lima Metropolitana en negro y el de Callao en rojo, obtenidos con el código, y luego en la figura 21 se ilustran todos los nodos con los que se trabajará en esta investigación.

Tabla 7 – Pasos para generar nodos en Lima y Callao

Fila	Paso	Operación
1.	Leer los shapes	<code>Peru&lt;-readOGR(dsn = 'C:/Users/RENZO/Downloads';layer='BAS_LIM_PROVINCIA')</code>
2.		<code>which(Peru\$FIRST_IDPR%in%c('1501','0701'))</code>
3.	Escoger polígonos	<code>Lima&lt;- project(Peru@polygons[[112]]@Polygons[[2]]@coords,proj =</code>
4.		<code>Peru@proj4string@projargs, inverse = T)</code>
5.		<code>Callao&lt;-project(Peru@polygons[[29]]@Polygons[[1]]@coords,proj =</code>
6.		<code>Peru@proj4string@projargs, inverse = T)</code>
7.	Crear puntos	<code>espaciado&lt;-0.01</code>
8.		<code>puntos&lt;-expand.grid(seq(min(min(Lima[,1]),min(Callao[,1])),</code>
9.		<code>max(max(Lima[,1]),max(Callao[,1])),by = espaciado),</code>
10.		<code>seq(min(min(Lima[,2]),min(Callao[,2])),max(max(Lima[,2]),max(Callao[,2])),by =</code>
11.		<code>espaciado))</code>
12.	Seleccionar puntos	<code>p_Lima&lt;-point.in.polygon(point.x = puntos[,1],point.y = puntos[,2],pol.x =</code>
13.		<code>Lima[,1],pol.y = Lima[,2])</code>
14.		<code>p_Callao&lt;-point.in.polygon(point.x = puntos[,1],point.y = puntos[,2],pol.x =</code>
15.		<code>Callao[,1],pol.y = Callao[,2])</code>
16.	Plotear puntos	<code>plot(Lima,asp=1,type='l')</code>
17.		<code>points(Callao,col=2,type='l')</code>
18.		<code>points(puntos,type = 'p')</code>
19.		<code>points(puntos[which(p_Lima==1)],,type = 'p',col=2,pch=".")</code>
20.		<code>points(puntos[which(p_Callao==1)],,type = 'p',col=3,pch=".")</code>
21.	Exportar datos	<code>write.table(puntos[which(p_Lima==1)],file = "PuntosLima.csv",row.names=FALSE,</code>
22.		<code>sep="\t")</code>
23.		<code>write.table(puntos[which(p_Callao==1)],file = "PuntosCallao.csv",row.names=FALSE,</code>
24.		<code>sep="\t")</code>

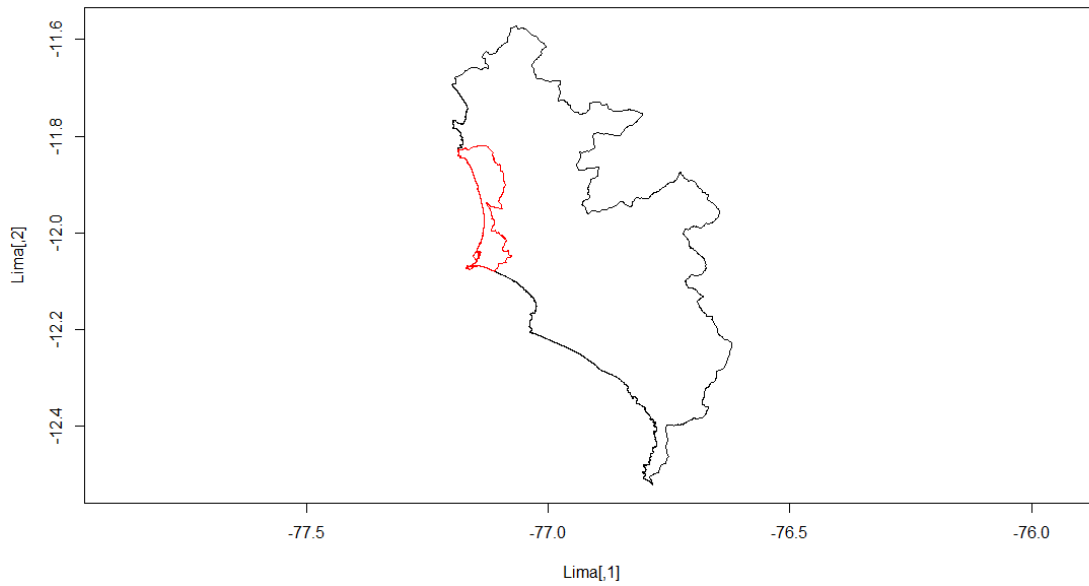


Figura 20. Contorno de Lima Metropolitana y Callao

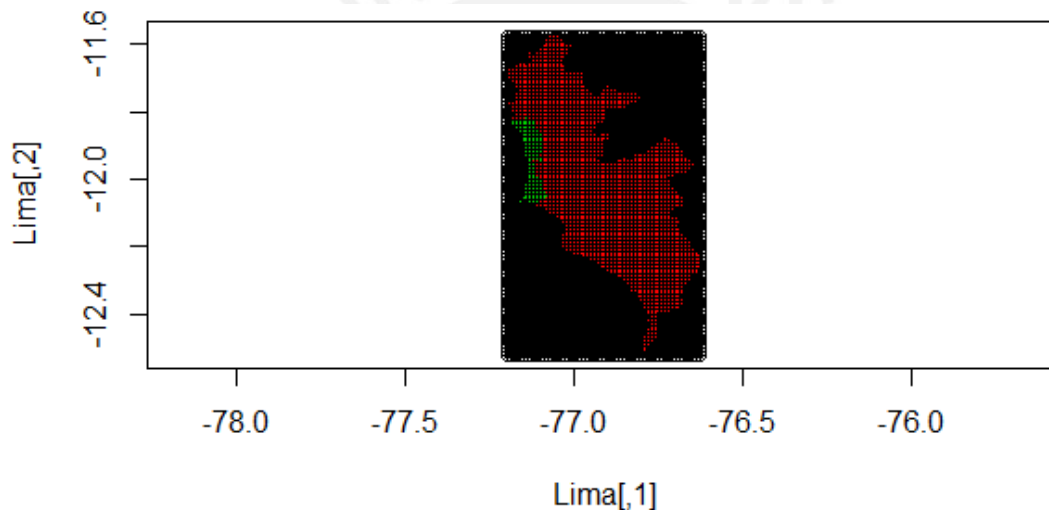


Figura 21. Nodos generados dentro de Lima Metropolitana y Callao

Se generaron en total 2,297 nodos dentro del contorno de Lima y Callao. Luego de esto, se ejecutará el algoritmo de k-medias; sin embargo, es necesario determinar qué valor de k se tomará. Para esto se evaluó cómo varía la suma de cuadrados de la distancia de los nodos de un clúster con su centro según los pasos de la tabla 8. En la figura 22 se observa cómo varía este indicador.

Tabla 8 – Pasos para evaluar la suma de cuadrados de cada k

Fila	Paso	Operación
1.	Leer la data	<code>Nodos &lt;- read.csv("C://Users//RENZO//Dropbox//Tesis Renzo Benavente//Nodos.csv", head=T)</code>
2.		
3.	Calcular suma de	<code>wss &lt;- sum(kmeans(Nodos[,2:3],centers=1)\$withinss)</code>
4.	cuadrados	<code>for (i in 2:15) wss[i] &lt;- sum(kmeans(Nodos[,2:3],centers=i)\$withinss)</code>
5.	Plotear	<code>plot(1:15, wss, type="b", xlab="# de Clusters",ylab="Suma de cuadrados")</code>

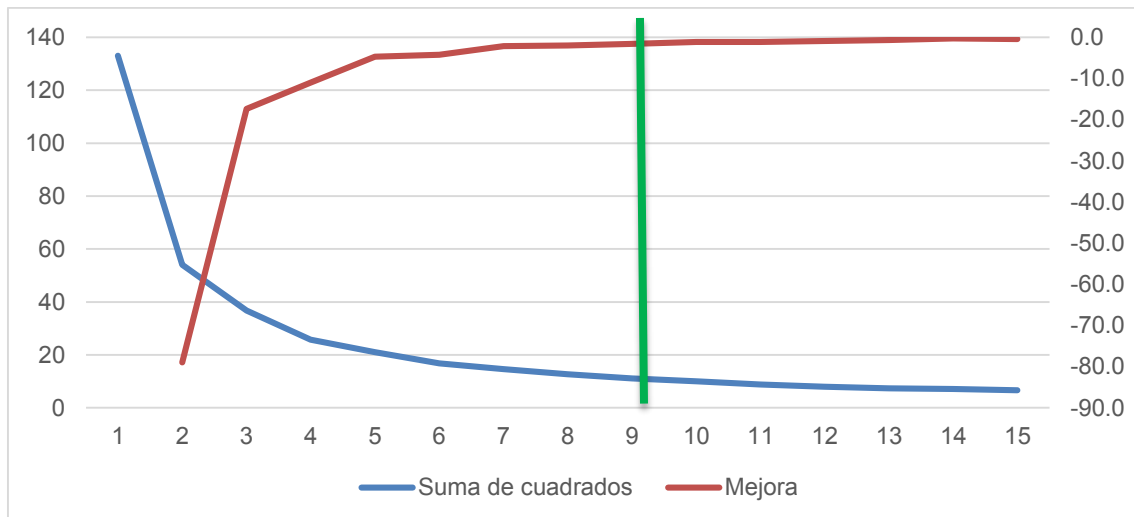


Figura 24. Evaluación del valor que toma k

Se puede observar que a partir de k igual a 9 la mejora ya no es significativa. Esta mejora representa cuánto se redujo la suma de cuadrados con respecto a la iteración inmediata anterior. Luego, se ejecuta de nuevo el algoritmo de k-medias con k fijado en 9 y se asigna un almacén fijo a cada nodo según los pasos de la tabla 9.

Tabla 9 – Pasos para clusterizar con k fijado en 9

Fila	Paso	Operación
1.	Leer la data	<code>Nodos &lt;- read.csv("C://Users//RENZO//Dropbox//Tesis Renzo Benavente//Nodos.csv", head=T)</code>
2.		
3.	Clusterizar	<code>clusters &lt;- kmeans(Nodos[,2:3],9)</code>
4.		<code>plot(Nodos[,2:3],col=clusters\$cluster)</code>
5.	Añadir depósito	<code>Nodos\$Depot &lt;- as.factor(clusters\$cluster)</code>
6.	Cargar mapa	<code>LimaMap &lt;- get_googlemap(center = c(lon = -76.9, lat = -12), zoom = 10,</code>
7.		<code>size = c(640, 640), scale = 2)</code>
8.	Plotear mapa	<code>ggmap(LimaMap) + geom_point(mapping = aes(x=LON,y=LAT), data = Nodos,</code>
9.		<code>col=Nodos\$Depot)</code>

En la figura 23 se ilustra cómo están distribuidos estos 9 clústeres en Lima Metropolitana y Callao. Se generó además un vector que indica el tamaño de cada clúster en términos de nodos: {291, 246, 275, 283, 215, 235, 245, 251, 256}, así como la ubicación de cada uno de estos almacenes fijos. A la data de nodos se le añadió un campo que indica a qué almacén fijo pertenecen.

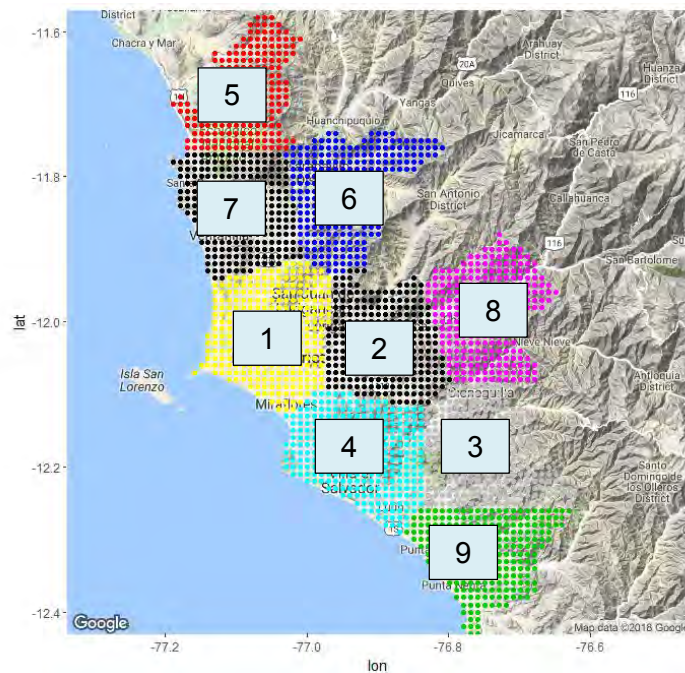


Figura 23. Mapa con los 9 clústeres calculados

## 4.2 Fase 2: Almacenes temporales

Para esta fase primero se generó de manera aleatoria escenarios de cuánto sería la criticidad de cada nodo según la escala del 1 al 5 mencionado en el punto 3.3.1. Se generó 1,000 escenarios de números aleatorios siguiendo una distribución normal con una media que dependía de la vulnerabilidad de la zona. Cabe resaltar que no se busca obtener una distribución única pues el modelo es flexible para cualquier escenario planteado y se usa esta distribución para ejemplificar un posible escenario. Es decir, las zonas con mayor vulnerabilidad tenían mayor probabilidad de generar un 5, mientras que las zonas más seguras tenían mayor presencia de nodos con valor 1.

Para obtener el indicador esperado de la zona, y con esto crear una distribución, se calculó previamente la cantidad de damnificados estimada con base en una investigación previa de CISMID (2009). Dependiendo del total, se dividió en 5 grupos con la siguiente lógica mostrada en la tabla 10. Según esto, se obtuvo el indicador esperado para cada distrito de Lima Metropolitana y Callao como se muestra en la tabla 11.

Tabla 10 – Indicador esperado por rangos

Rango	Indicador
0 a 99	1
100 a 449	2
450 a 849	3
850 a 1999	4
más de 2000	5

Tabla 11 – Indicador esperado por rangos

Distrito	Nodos generados	Población por nodo	Damnificados por nodo	Indicador esperado
Ancón	257	169	4	1
Ate	68	9,266	1,837	4
Barranco	2	14,992	6,094	5
Bellavista	5	14,367	862	4
Breña	1	75,925	4,555	5
Callao	41	9,924	7,939	5
Carabaylo	260	1,161	929	4
Carmen de la Legua	1	41,100	451	3
Chaclacayo	37	1,174	26	1
Chorrillos	30	10,852	2,963	5
Cieneguilla	188	250	3	1
Comas	44	11,929	9,544	5
El Agustino	12	15,947	1,276	4
Independencia	14	15,487	431	2
Jesús María	4	17,897	537	3
La Molina	41	4,186	280	2
La Perla	3	19,606	1,176	4
La Punta	1	3,392	203	2
La Victoria	9	19,087	1,107	4
Lima	17	15,989	1,772	4
Lince	2	25,114	753	3
Los Olivos	14	26,516	877	4
Lurigancho	203	1,079	664	3
Lurín	160	532	18	1
Magdalena del Mar	3	18,219	489	3
Miraflores	9	9,104	250	2
Pachacámac	149	870	99	1
Pucusana	22	775	110	2
Pueblo Libre	4	19,029	571	3
Puente Piedra	41	8,618	6,894	5
Punta Hermosa	98	78	1	1
Punta Negra	109	73	1	1
Rímac	10	16,491	574	3
San Bartolo	43	179	26	1
San Borja	9	12,436	373	2
San Isidro	8	6,776	203	2
San Juan de Lurigancho	114	9,573	4,966	5
San Juan de Miraflores	22	18,364	10,111	5
San Luis	3	19,200	423	2
San Martín de Porres	29	24,144	731	3
San Miguel	8	16,938	1,016	4
Santa Anita	8	28,553	628	3
Santa María del Mar	7	230	3	1
Santa Rosa	14	1,339	47	1
Santiago de Surco	26	13,240	535	3
Surquillo	2	45,673	1,370	4
Ventanilla	65	6,589	395	2
Villa El Salvador	27	17,149	7,509	5
Villa María del Triunfo	53	8,463	4,390	5

Fuente: CISMID (2010)



Se le asignará a cada nodo generado el atributo del indicador esperado dependiendo del distrito al que pertenezca. Luego, se generó 1,000 escenarios de posibles indicadores siguiendo una distribución normal con media igual al esperado y desviación estándar de 0.5. En la tabla 12 se muestra un ejemplo de 11 escenarios generados para los 15 primeros nodos de la base.

Tabla 12 – Extracto de simulaciones por nodo

ID	LAT	LON	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	-12.1	-77.2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	3	2
2	-12.1	-77.1	4	4	4	4	4	5	4	3	4	4	3
3	-12.1	-77.1	4	4	3	4	4	4	4	5	4	4	4
4	-12.1	-77.1	4	3	5	4	4	3	4	4	4	4	4
5	-12.1	-77.1	5	5	4	5	5	4	5	5	5	5	5
6	-12.1	-77.1	5	5	5	5	4	5	4	5	5	4	5
7	-12.1	-77.1	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4
8	-12.1	-77.1	5	4	4	4	5	3	5	4	3	4	4
9	-12.1	-77.1	4	4	4	3	4	4	4	4	5	4	4
10	-12.1	-77.1	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4
11	-12.1	-77.1	5	3	5	5	4	4	4	4	4	4	4
12	-12.0	-77.1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
13	-12.0	-77.1	5	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5
14	-12.0	-77.1	5	5	4	5	5	5	4	5	5	4	5
15	-12.0	-77.1	5	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5

En cada uno de los clústeres se ejecutará el modelo de programación lineal indicado en el punto 3.3.2 con lo que se obtiene la cantidad y ubicación de los almacenes temporales. En la figura 24 se muestra un extracto de la modelación en AMPL en la cual se observa la función objetivo de la misma.

```

minimize Distancia_Total:
    sum{(i,j) in Matriz} X[i,j]*Distancia1[i,j] +
    sum{i in Vector} Y[i]*Distancia2[i];

```

Figura 24. Extracto de modelado en AMPL

El promedio de los resultados de los 1,000 escenarios se muestra consolidado en la tabla 13 indicando ubicación de los almacenes fijos y cuántos almacenes temporales tienen asignados. Como se puede apreciar, algunos clústeres tienen más de 20 almacenes temporales pues es una zona con mayor vulnerabilidad, mientras que otros tienen menos de 10 incluso. En total, si se toma este escenario promedio, se tendrían 161 almacenes temporales +/- 3 debido a la desviación de la distribución inicial.

Tabla 13 – Cantidad de almacenes temporales por clúster

Almacén fijo	Distrito	Latitud	Longitud	Temporales promedio
1	Rímac	-12.014	-77.049	30
2	Chaclacayo	-11.988	-76.746	16
3	Lurín	-12.180	-76.747	9
4	Villa María del Triunfo	-12.180	-76.923	24
5	Ancón	-11.685	-77.088	7
6	Carabayllo	-11.818	-76.944	25
7	Puente Piedra	-11.845	-77.094	20
8	Lurigancho	-12.029	-76.891	21
9	Punta Negra	-12.329	-76.749	9

En la figura 25 se ilustra las 30 zonas que se calculó para el clúster 1 por colores. En cada zona se armará un almacén temporal el cual la atenderá con bienes de ayuda humanitaria. De manera similar, las figuras 26 a la 33 muestran las zonas calculadas para los clústeres 2 al 9, respectivamente. Estos almacenes temporales inicialmente estarán vacíos pues se armarán luego de ocurrido el sismo. Por este motivo, el siguiente paso es realizar un plan de ruteo, partiendo desde el almacén fijo y llegar a cada uno de sus almacenes temporales asignados.

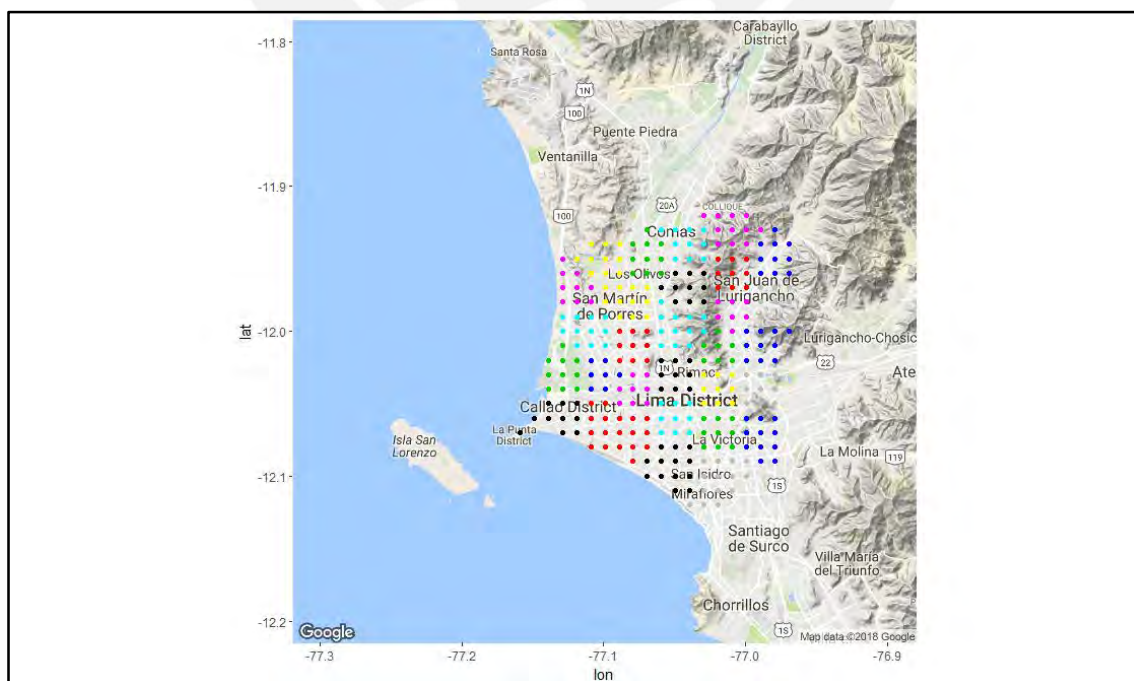


Figura 25. Mapa de los 30 grupos del clúster 1

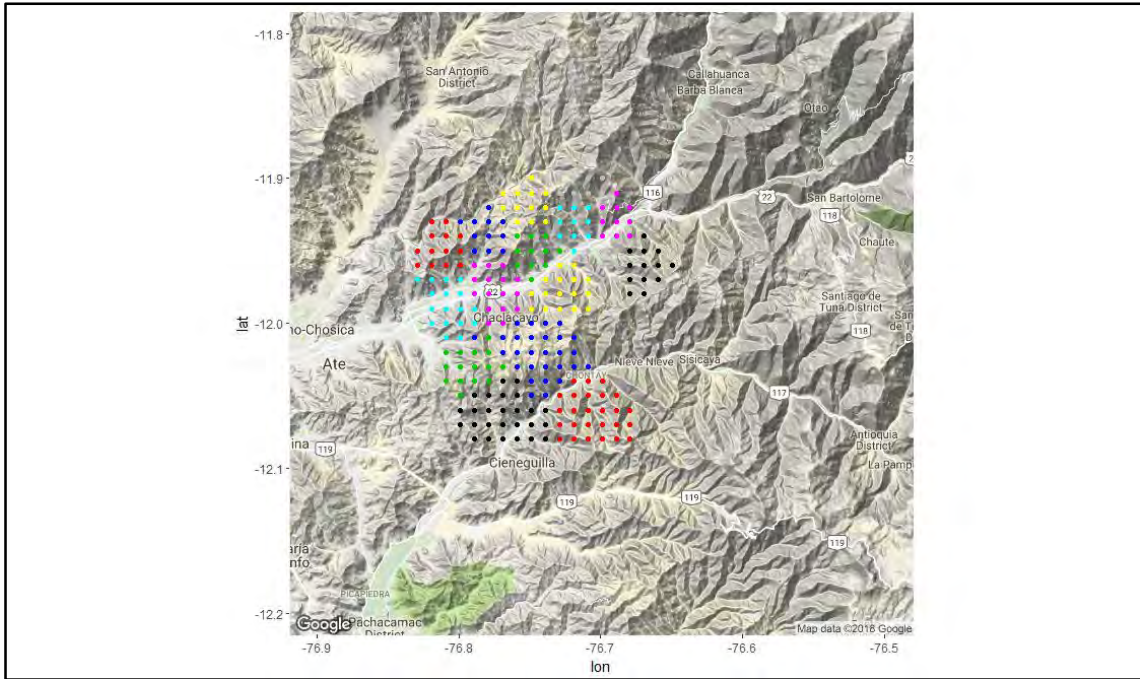


Figura 26. Mapa de los 16 grupos del clúster 2

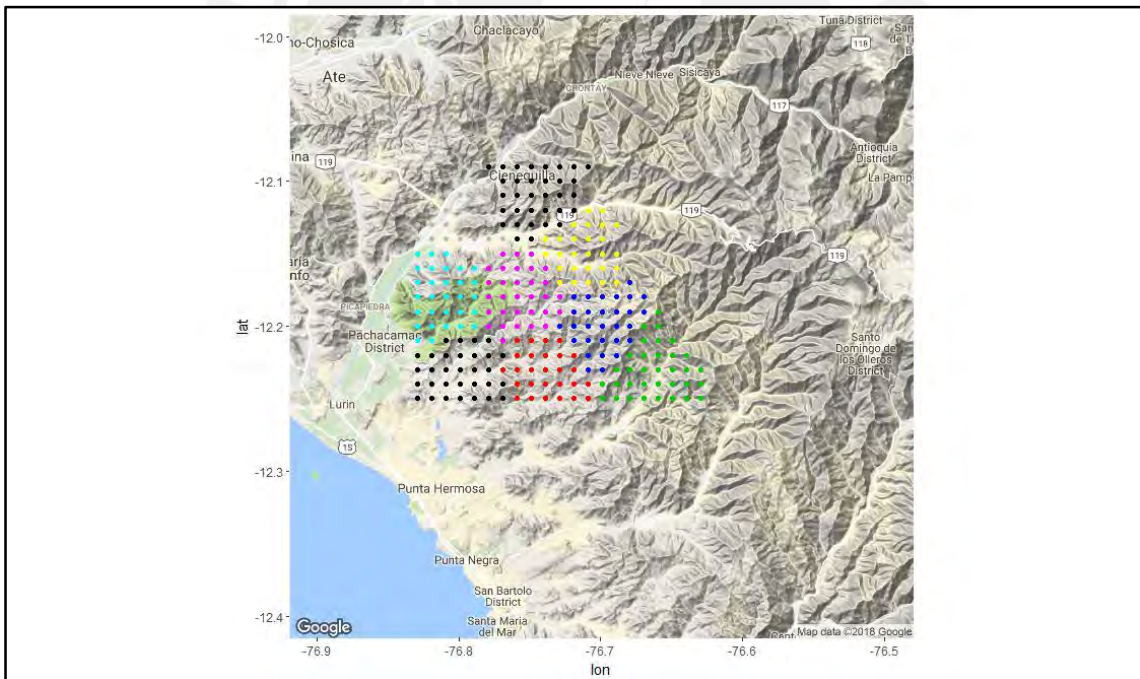


Figura 27. Mapa de los 9 grupos del clúster 3

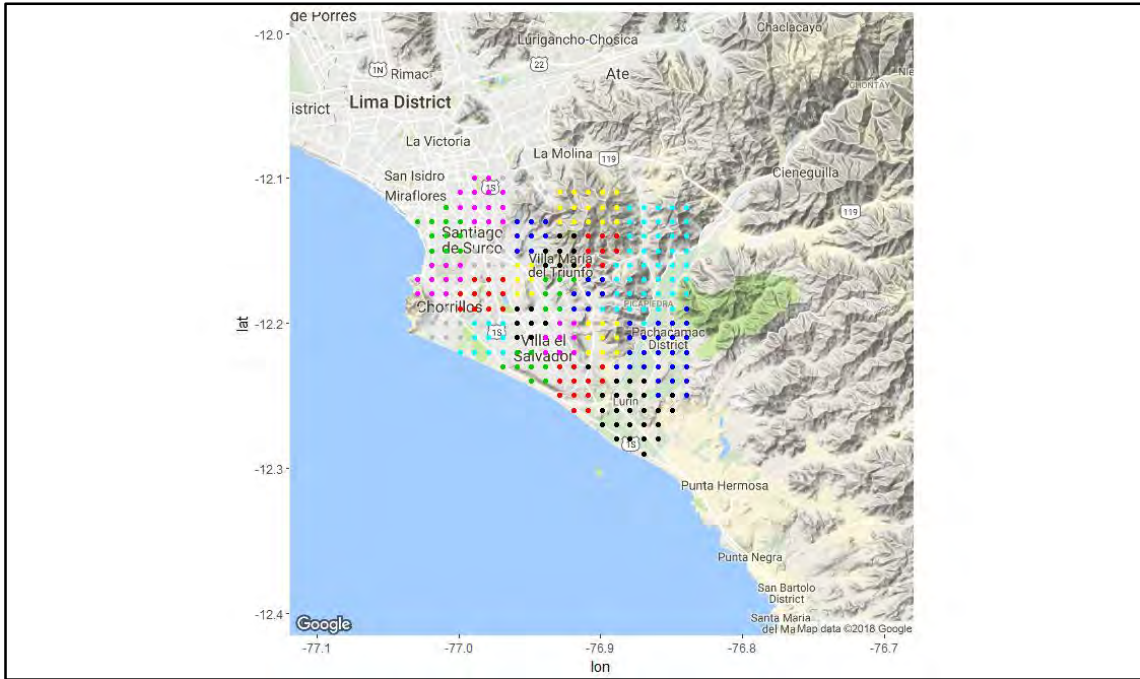


Figura 28. Mapa de los 24 grupos del clúster 4

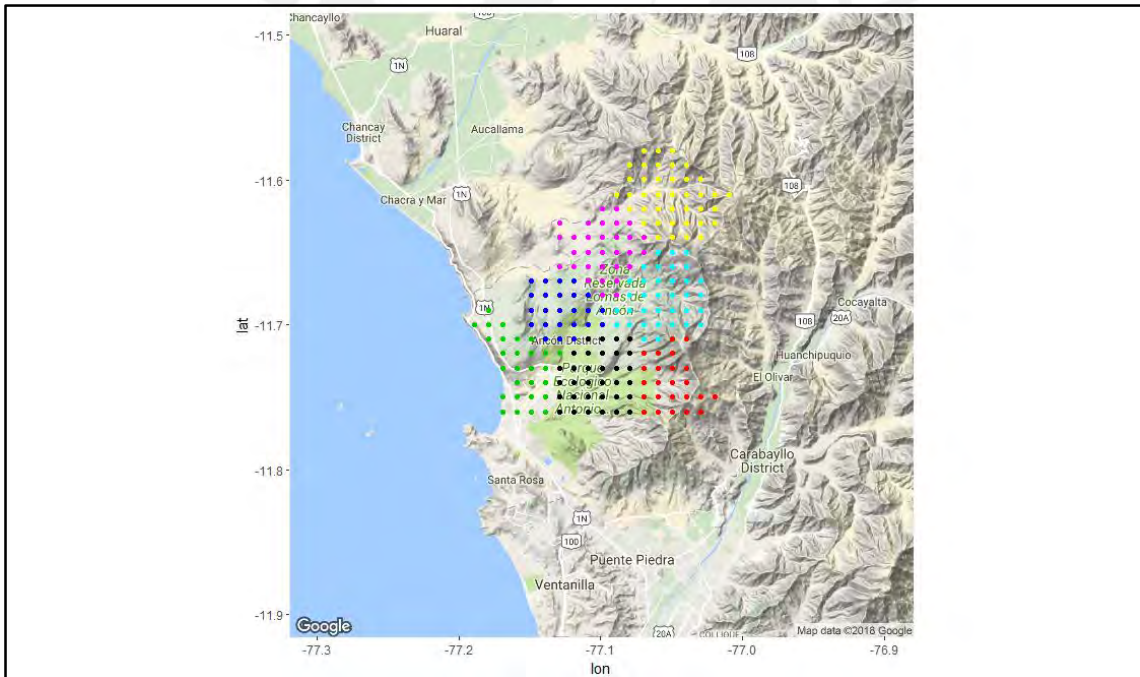


Figura 29. Mapa de los 7 grupos del clúster 5

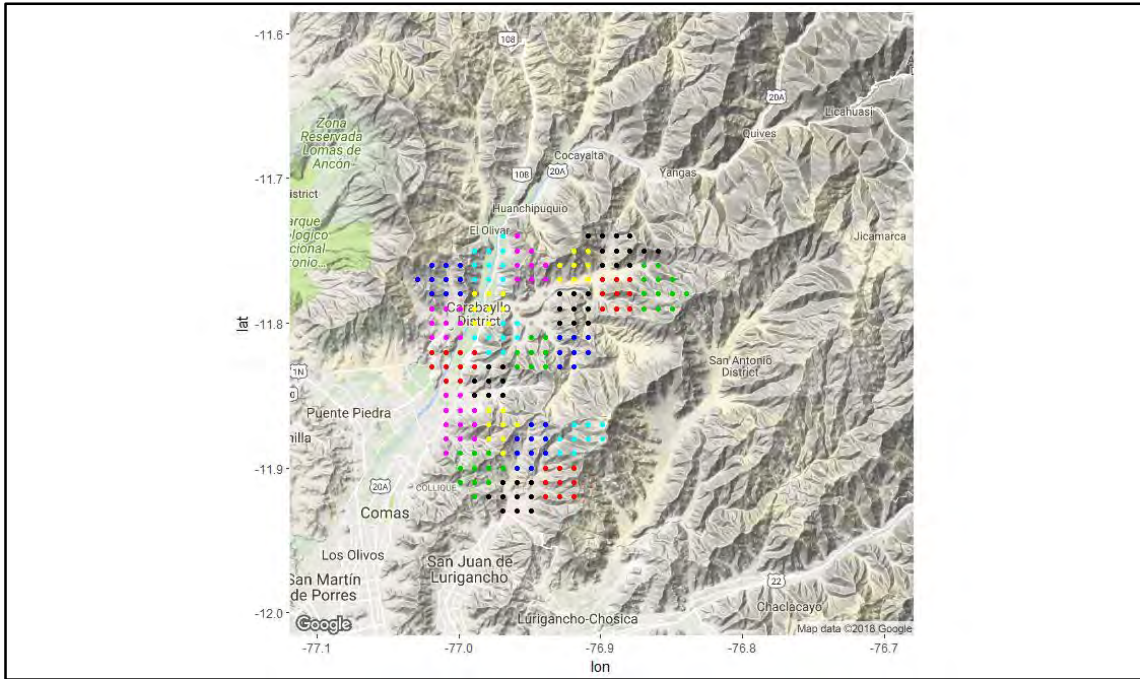


Figura 30. Mapa de los 25 grupos del clúster 6

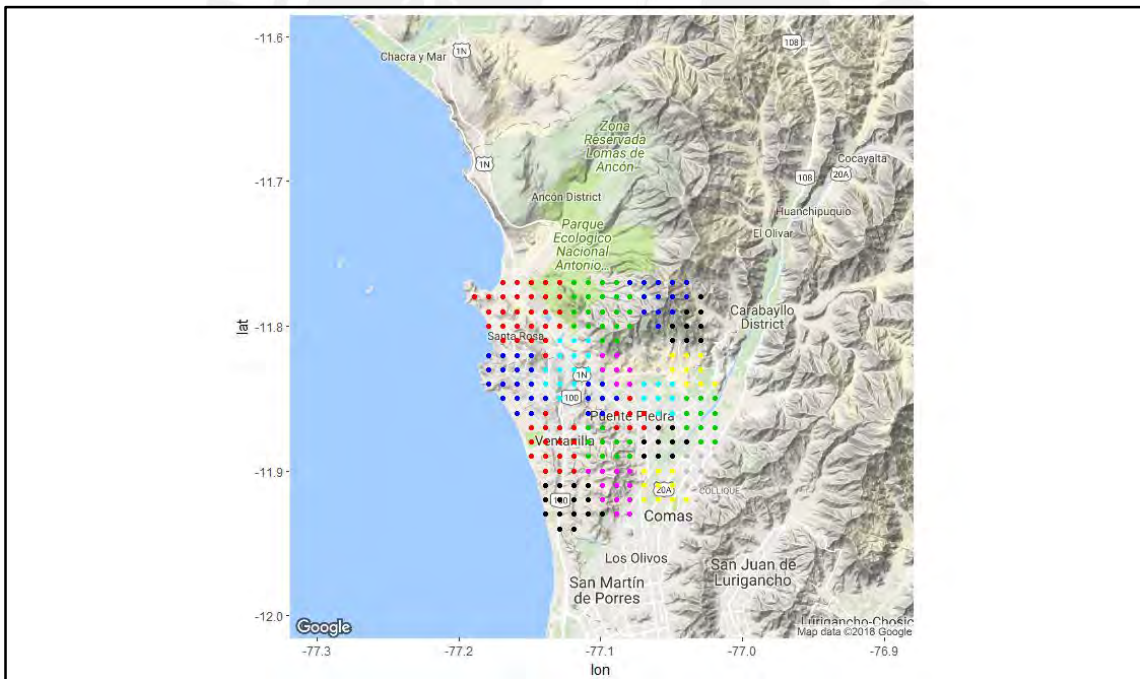


Figura 31. Mapa de los 20 grupos del clúster 7

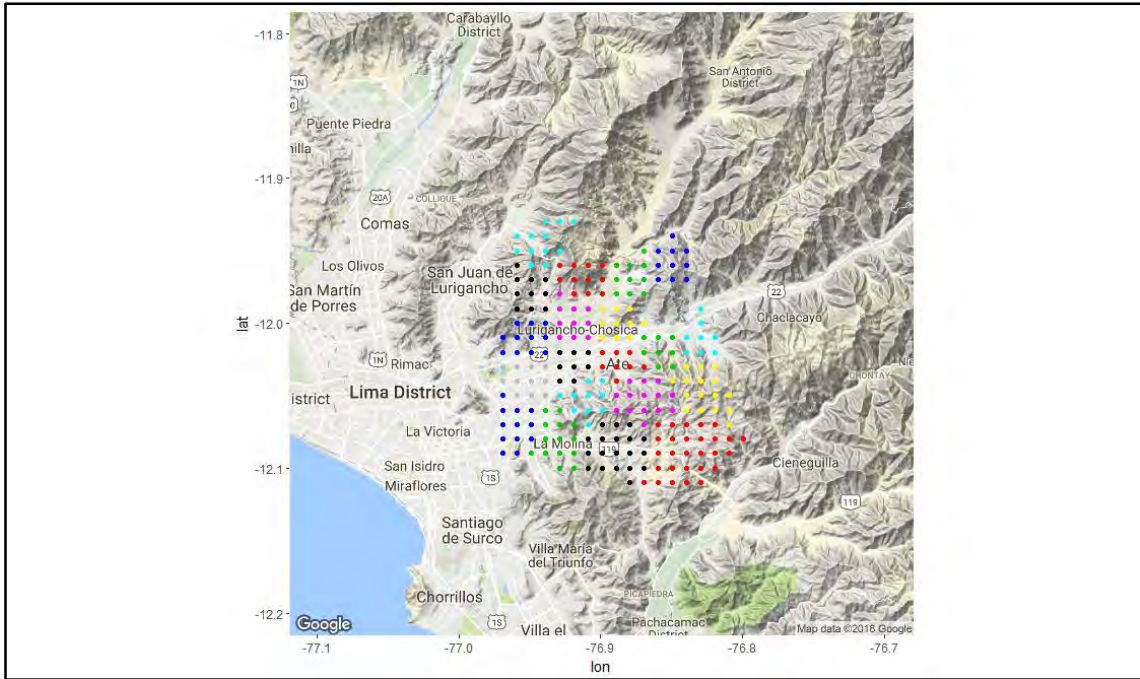


Figura 32. Mapa de los 21 grupos del clúster 8

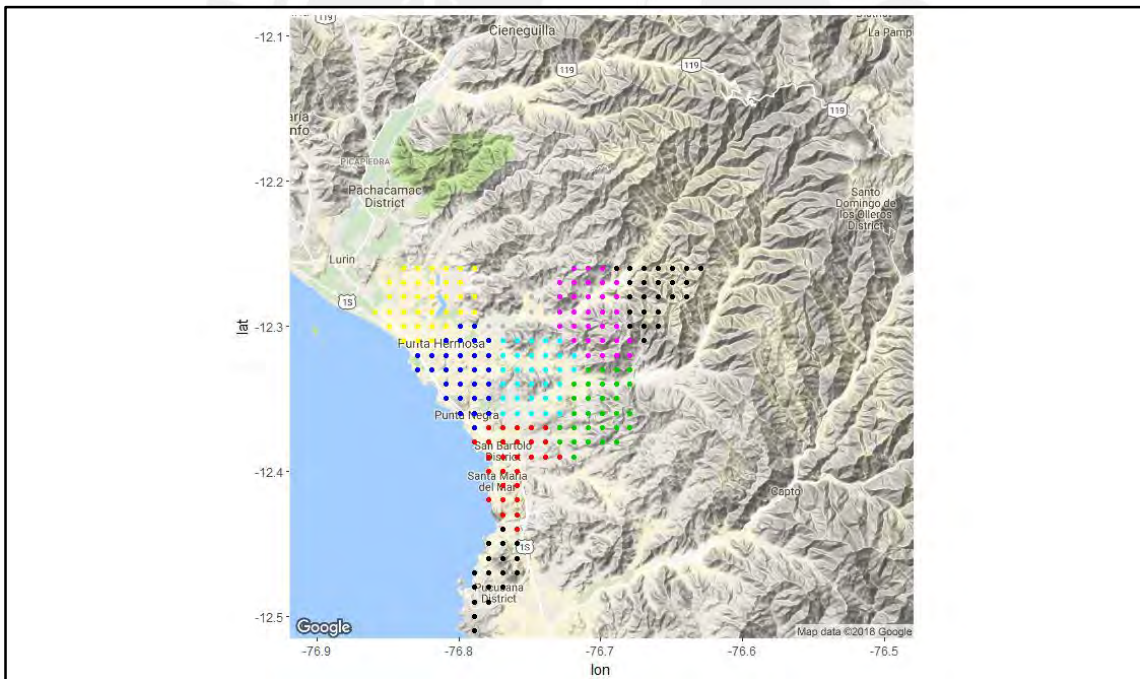


Figura 33. Mapa de los 9 grupos del clúster 9

Cabe resaltar que este es un escenario simulado como ejemplo, y se considera por ejemplo nodos de demanda en sitios como los centros poblados que se extienden hasta la ladera de los cerros. En un contexto real ya cuando suceda el sismo, se le asignará la demanda correspondiente si es que lo amerita o no, es decir que es posible que algunos nodos tengan demanda cero y no se tengan que tomar en consideración.

En la figura 25 se muestran todos los almacenes temporales calculados para el escenario de ejemplo, diferenciados por colores. De nuevo, este es un escenario simulado como ejemplo y si cuando ocurriese el terremoto hay alguna zona muy afectada no se considerará como candidata para establecer un almacén temporal. En otras palabras, si se tiene un deslizamiento en un cerro y el terreno sigue inestable, entonces este nodo se considerará como punto de demanda, pero se excluirá de la lista de nodos candidatos a localizar un almacén temporal.

La dinámica será que cada almacén fijo irá abasteciendo de bienes de ayuda humanitaria a sus almacenes temporales de manera continua. Para este objetivo, es necesario correr un modelo de ruteo de vehículos sobre cada clúster.

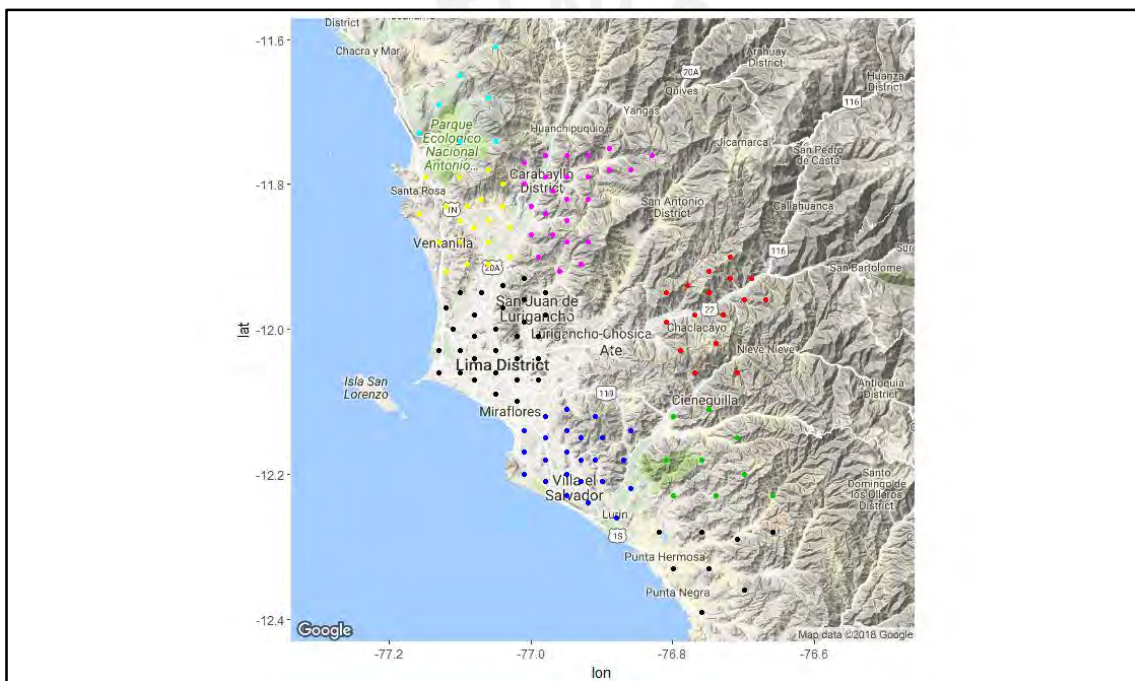


Figura 34. Mapa de los 161 almacenes temporales

El modelo de ruteo descrito en el punto 1.1.1 necesita cuatro parámetros. Para este ejemplo consideraremos que hay algunas vías bloqueadas de manera aleatoria, que los vehículos tienen una capacidad para atender a nodos que en conjunto sumen criticidad 200, que atiendan la demanda generada en el punto anterior, y que se tengan disponibles siete vehículos. Para cuando se ejecute en la realidad se reemplazarán estos parámetros de demanda, distancias, capacidad y cantidad de vehículos por la información real recopilada. En la figura 35 se muestra un extracto del modelado en AMPL para el problema de ruteo de vehículos empleado.

```

minimize Distancia_total:
    sum {(i,j) in Arco: i<>j} X[i,j] * Distancias[i,j];

subject to Todo_entra {i in Nodo: i>1}:
    sum {j in Nodo: i<>j} X[i,j] = 1;

subject to Todo_sale {i in Nodo: i>1}:
    sum {j in Nodo: i<>j} X[j,i] = 1;

subject to Vehiculos:
    sum {j in Nodo: j>1} X[1,j] <= K;

subject to Subtours {(i,j) in Arco: i>1 and j>1 and i<>j}:
    u[i] - u[j] + Capacidad * X[i,j] <= Capacidad -
    demanda[i];

subject to Limites {i in Nodo: i>1}:
    demanda[i] <= u[i] <= Capacidad;

```

Figura 35. Extracto de modelado en AMPL

En la figura 36 se ilustra un ejemplo de cómo quedaría el ruteo para el clúster 7 calculado previamente. En este ejemplo se formaron 4 rutas distintas, partiendo desde el almacén fijo con el objetivo de abastecer a los 20 almacenes temporales del clúster. Dependiendo de la disponibilidad de vehículos y la priorización de los mismos, se podría usar un vehículo por cada ruta, o que el mismo carro realice una secuencia de rutas.

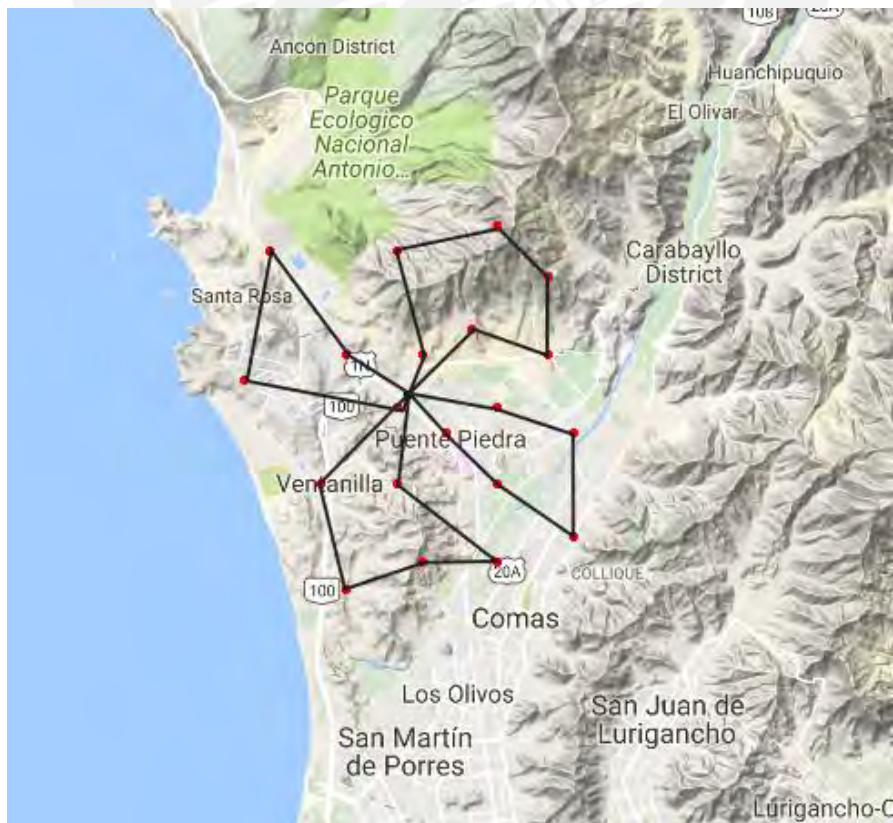


Figura 36. Rutas para el clúster 7



# CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1 Conclusiones

- Si bien la frecuencia de desastres naturales es baja en Lima Metropolitana y Callao, a diferencia de otros departamentos de Perú, es necesario incrementar el número de almacenes adelantados. Esto se explica porque Lima concentra la tercera parte de la población del país y si es que ocurre un sismo de gran magnitud el impacto social sería también a gran escala.
- El presente estudio evalúa un incremento en almacenes adelantados fijos con base en una clusterización hecha previa al sismo, y una propuesta de almacenes temporales ubicados con base en información recopilada luego del sismo. Lo que busca esta estrategia es aumentar el dinamismo de la entrega de ayuda y lograr canalizar los bienes recibidos de otras fuentes como ONG o gobiernos internacionales.
- En la fase previa al sismo, el modelo propone dividir Lima Metropolitana y Callao en 9 clústeres de similar extensión territorial. En cada uno de ellos se ubicará un almacén fijo que se encargará de suministrar de ayuda humanitaria a la población del clúster.
- En la fase posterior al sismo, se generó escenarios de ejemplo para cada clúster obteniendo un total de 161 almacenes temporales en Lima Metropolitana y Callao. Posterior a esto se ejecutó el modelo de problema de ruteo de vehículos para obtener el plan de distribución desde los almacenes fijos hacia los temporales.
- En la realidad, cuando suceda un sismo de gran magnitud y se recolecte la información de los daños por cuadrantes, se ejecutarán los modelos de la fase 2 (*post sismo*) y se obtendrá la cantidad y ubicación de almacenes temporales. Este monto podrá ser mayor o menor al escenario ejemplo mostrado dependiendo de la magnitud e intensidad del sismo evaluado.
- La mayor ventaja de esta metodología es su flexibilidad pues cualquier variante planificada solo deberá ajustar los parámetros. Por ejemplo, si se quiere repartir un tipo de bienes de ayuda de un volumen dado y luego probar con bienes de otro volumen, solo deberá cambiar la capacidad de los almacenes y de los vehículos. Así mismo, si se tienen vías terrestres dañadas, se modifica el parámetro de distancia por un número muy alto y el mismo modelo las evitará.

## 5.2 Recomendaciones

- La metodología propuesta puede ser replicable en otras provincias o incluso países, tanto para terremotos como para algún otro desastre en el que se requiera repartir ayuda humanitaria.
- Para garantizar el éxito del plan propuesto es importante tener concientización en la población. Por ejemplo un paso crucial para el modelo es la recolección de indicadores del 1 al 5 que reflejan el impacto en los distritos. El responsable de cuadrante debe enviar el mensaje SMS de manera oportuna y correcta para realizar las primeras corridas del modelo.
- Además, se recomienda tener plantillas ya hechas de los modelos listos para completar con parámetros y ejecutarlos una vez ocurrido el sismo de gran magnitud. De esta manera se reducirá el tiempo de planificación antes de enviar a los encargados de armar los almacenes temporales.
- Para esta investigación, se utilizó el optimizador AMPL en su versión completa. Sin embargo, para ejecutarlo en la realidad podrían hacer uso de otros softwares de optimización que sean gratuitos. Para esto tendría que programarse el modelo algebraico mostrado según el lenguaje de programación adecuado.
- Una de las ventajas mencionadas es que el flujo logístico tendrá mayor dinamismo siempre y cuando estos almacenes canalicen todo tipo de ayuda. Para lograr esto, se recomienda tener reuniones previas con los *stake holders* para que cuando llegue el momento sepan dónde y cómo enviar la ayuda humanitaria.
- Para futuras investigaciones, se podría incluir restricciones de poblaciones cercanas a los nodos, o cercanía a instituciones como colegios o universidades en los modelos de ubicaciones de almacenes temporales o incluso el número total de almacenes temporales a construir por una limitante presupuestal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmadi, M., Seifi, A., & Tootooni, B. (2015). A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 145-163.

Avella, P., Boccia, M., Sforza, A., & Vasil'ev, I. (2009). An effective heuristic for large-scale capacitated facility location problems. *Journal of Heuristics*, 15(6), 597-615.

Bargos, F. F., de Queiroz Lamas, W., Bargos, D. C., Neto, M. B., & Pardal, P. C. P. M. (2016). Location problem method applied to sugar and ethanol mills location optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 274-282.

Benavente, R., & Cornejo, C. (2017). Plan de ruteo para la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria ante un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao. 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology.

Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility Location Optimization Model for Emergency Humanitarian Logistics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.

Centro de Estudios y Prevención de Desastres (2009). Diseño de escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao.

Chan, Y., Carter, W. B., & Burnes, M. D. (2001). A multiple-depot, multiple-vehicle, location-routing problem with stochastically processed demands. *Computers & Operations Research*, 28(8), 803-826.

Chang, K., Zhou, H., Chen, G., & Chen, H. (2017). Multiobjective Location Routing Problem considering Uncertain Data after Disasters. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2017.

Chopra, S., & Meindl, P. (2013) *Administración de la cadena de suministro*. Quinta edición. México.

Clark, A., & Cullkin, B. (2013). A network transshipment model for planning humanitarian relief operations after a natural disaster. In *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies* (pp. 233-257). Atlantis Press.

Clarke, G. U., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.

Cornejo, C., Vargas, J., Aragón, L., & Serpa, V. (2013). Localización de almacenes y distribución de ayuda humanitaria para atención de damnificados en caso de desastre natural. 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology.

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.

- Eiselt, H. A., & Sandblom, C. L. (2013). Decision analysis, location models, and scheduling problems. Springer Science & Business Media.
- Flores Garrido, L., & Oliva San Martín, C. (2016). Algoritmos para el problema de localización de plantas y centros de distribución maximizando beneficio. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(3), 493-501.
- Friend, J., & Hickling, A. (2012). Planning under pressure. Routledge.
- Haghi, M., Ghomi, S. M. T. F., & Jolai, F. (2017). Developing a robust multi-objective model for pre/post disaster times under uncertainty in demand and resource. *Journal of Cleaner Production*.
- Hamed, M., Haghani, A., & Yang, S. (2012). Reliable transportation of humanitarian supplies in disaster response: model and heuristic. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 1205-1219.
- Hansen, P. H., Hegedahl, B., Hjortkjaer, S., & Obel, B. (1994). A heuristic solution to the warehouse location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 76(1), 111-127.
- Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(1), 100-108.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2001). *Introducción a la investigación de operaciones*, McGraw Hill. New York.
- Hostovsky, C. (2006). The paradox of the rational comprehensive model of planning: Tales from waste management planning in Ontario, Canada. *Journal of Planning Education and Research*, 25(4), 382-395.
- IACOB, S. V. (2014). Distribution center optimum localization and the gravitational model. *Journal of Applied Quantitative Methods*, 62.
- Instituto Nacional De Defensa Civil (2010) *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres*. Lima, Perú.
- Instituto Nacional De Defensa Civil (2011) *Plan de Operaciones de Emergencia para el Área Metropolitana de Lima y la Región del Callao*. Lima, Perú.
- Kuroiwa, J. (2002). *Reducción de desastres: viviendo en armonía con la naturaleza*. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Lam, M., & Mittenthal, J. (2013). Capacitated hierarchical clustering heuristic for multi depot location-routing problems. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 16(5), 433-444.
- Mirabi, M., Ghomi, S. F., & Jolai, F. (2010). Efficient stochastic hybrid heuristics for the multi-depot vehicle routing problem. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(6), 564-569.

- Papadimitriou, D., Colle, D., & Demeester, P. (2016). Mixed-integer optimization for the combined capacitated facility location-routing problem. In *Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2016 12th International Conference on the* (pp. 14-22). IEEE.
- Perl, J., & Daskin, M. S. (1985). A warehouse location-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 19(5), 381-396.
- Pirkwieser, S., & Raidl, G. R. (2010, October). Variable neighborhood search coupled with ILP-based very large neighborhood searches for the (periodic) location-routing problem. In *International Workshop on Hybrid Metaheuristics* (pp. 174-189). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Rybickova, A., Brodsky, J., Karaskova, A., & Mockova, D. (2015). A Genetic Algorithm for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Applied Mechanics & Materials*, 803.
- Sadegheih, A. (2017). A Hybrid Heuristic Algorithm to Solve Capacitated Location-routing Problem With Fuzzy Demands. *International Journal of Industrial Mathematics*, 9(1), 1-20.
- Safeer, M., Anbuudayasankar, S. P., Balkumar, K., & Ganesh, K. (2014). Analyzing Transportation and Distribution in Emergency Humanitarian Logistics. *Procedia Engineering*, 97, 2248-2258.
- SILGADO, E. (1975). Magnitud, frecuencia, periodo de retorno de terremotos y riesgo sísmico en la costa del Perú, entre 9 y 13.8 de latitud Sur. *Bol. Soc. Geog. Lima*, 94, 20-23.
- Sistema Nacional De Defensa Civil (2004) Plan nacional de atención y prevención de desastres. Lima, Perú.
- Steinhaus, H. (1956). Sur la division des corp materiels en parties. *Bull. Acad. Polon. Sci*, 1(804), 801.
- Tang, A. K., & Johansson, J. (2010). Pisco, Peru, earthquake of August 15, 2007: lifeline performance. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*.
- Tavera, H., & Heras, H. (2002) Localización de áreas probables a ser afectadas por grandes sismos en el borde oeste de Perú: Estimación a partir de periodos de retorno local basado en la distribución de valores de "b". *Bol Soc Geol Peru*, 93, 63-71.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). The vehicle routing problem, *Society for industrial and applied mathematics. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*.
- Trist, E. (1981). The evolution of socio-technical systems. *Occasional paper*, 2, 1981.
- Tuzun, D., & Burke, L. I. (1999). A two-phase tabu search approach to the location routing problem. *European journal of operational research*, 116(1), 87-99.
- Vargas, J., Medina, R., & Alva, R. (2015). A clustering optimization approach for disaster relief delivery: A case study in Lima-Peru. In *Information Management and Big Data* (pp. 69-80). Springer, Cham.

Wu, T. H., Low, C., & Bai, J. W. (2002). Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. *Computers & Operations Research*, 29(10), 1393-1415.

