

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**RUTEO DE AMBULANCIAS EN CASO DE UN SISMO DE GRAN
MAGNITUD EN LIMA METROPOLITANA Y CALLAO, UN ENFOQUE
DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA Y HEURÍSTICA
PARA SU RESOLUCIÓN**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Industrial

AUTORA:

Ivonne Rocío Heredia León

ASESOR:

Mg. Christian Santos Cornejo Sánchez

Lima, marzo, 2024

Informe de similitud

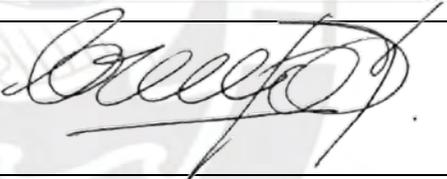
Yo, Christian Santos Cornejo Sánchez, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada

Ruteo de ambulancias en caso de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao, un enfoque de programación lineal entera mixta y heurística para su resolución

de la autora Ivonne Rocío Heredia León, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 15 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 1/05/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 1 de mayo de 2024

Apellidos y nombres del asesor: Cornejo Sánchez, Christian Santos	
DNI: 09868135	Firma 
ORCID: 0000-0003-1297-5510	

RESUMEN

Esta tesis se desarrolla en un escenario sísmico de 8.0Mw de magnitud en Lima Metropolitana y Callao y posterior ocurrencia de un tsunami, se estima que ese evento natural ocasionaría cerca de 110 000 fallecidos, 2 000 000 heridos y 900 000 viviendas afectadas (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2017). Asimismo, se presentan los planes del gobierno relacionados con la respuesta ante un desastre natural de esta magnitud, el Plan de Contingencia Nacional, el Plan de Operaciones de Emergencia de Lima y Callao y el Plan de Contingencia del sector salud en casos de sismos en las regiones de Lima y Callao. Posteriormente, se infiere la necesidad de un plan de traslado de heridos desde los puestos médicos de avanzada hacia los hospitales de campaña, con base en los sucesos del terremoto del 2007 en Pisco y se toma un escenario sísmico de magnitud 8.8 Mw en Lima Metropolitana y Callao con características similares al pronosticado por INDECI (2017), Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES, 2009) y Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2017).

Se propone un modelo de programación lineal entera basado en el modelo “Vehicle Routing Problem with Time Windows” (VRPTW) para el traslado de los pacientes en el escenario sísmico presentado. Este modelo maximiza la cantidad de pacientes atendidos y toma en cuenta las restricciones de capacidad de las ambulancias, capacidad de camas hospitalarias y el tiempo máximo que puede esperar un paciente antes de fallecer. Asimismo, como no se conoce a priori la cantidad de ambulancias, se determina esa cifra experimentalmente maximizando la cantidad de pacientes atendidos.

Debido a las limitaciones de cómputo que presenta el modelo al aumentar la cantidad de nodos, ya que VRPTW resulta en un problema NP-difícil, se propone una metaheurística inspirada en “Large Neighbourhood Search” (LNS) para hallar la solución al modelo, en donde se utilizan dos heurísticas para construir la solución inicial, ya sea una heurística de construcción de rutas u otra de inserción de rutas; así como la heurística “Variable Neighbourhood Descend” (VND) para la búsqueda local de la optimalidad. Finalmente, se aplica esta heurística a los seis clústeres dentro de la ventana de tiempo con las capacidades al 20%, 50% y 70% de los hospitales. Se observa que el modelo propuesto logra trasladar a una cantidad de pacientes igual a la capacidad total de los hospitales para los tres casos y el tiempo máximo de llegada del último paciente es menor a cuatro horas.

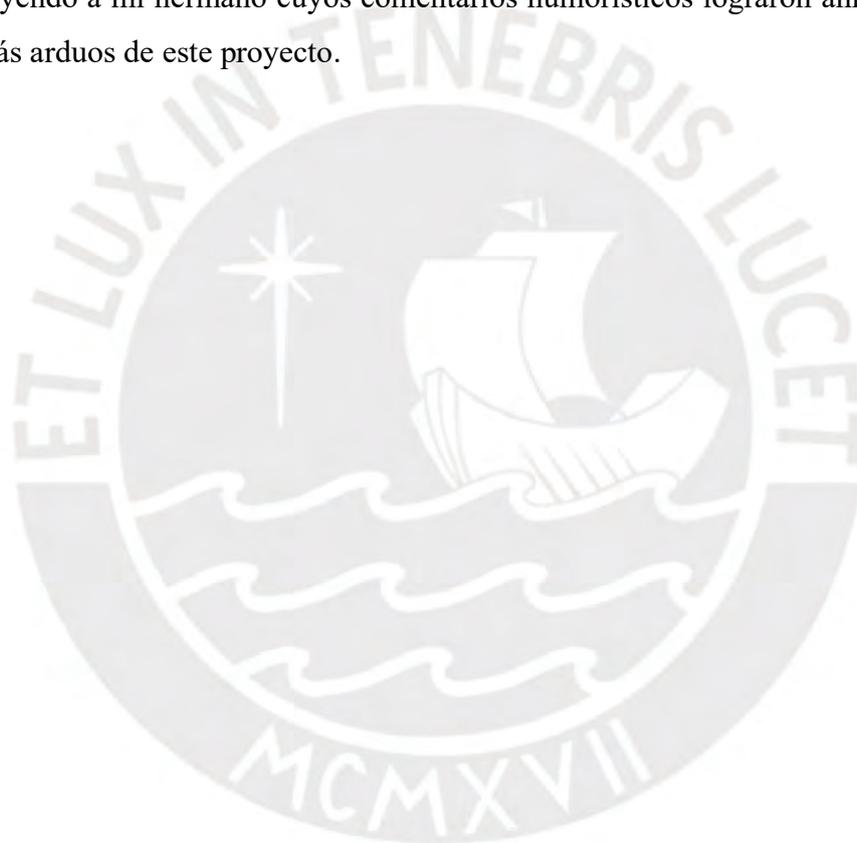
AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, el Mag. Christian Cornejo, quien me ha guiado y asesorado en este largo camino de la tesis.

A mis padres, Rocío y Oscar, por apoyarme en los retos que presenta la vida.

A Dios, por darme la oportunidad y la fortaleza necesaria para realizar este trabajo y poder culminar con la carrera universitaria

A los amigos, familiares y profesionales que me apoyaron y animaron para concluir este trabajo, incluyendo a mi hermano cuyos comentarios humorísticos lograron animarme en los momentos más arduos de este proyecto.





Dedicada a todas las personas damnificadas, para que sus memorias nos hagan resilientes ante los desastres. A mis padres, mi hermano, la memoria de mis abuelos que siempre me acompañarán y recordarán que todo logro requiere esfuerzo y dedicación.

Índice general

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA, PROBLEMÁTICA Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN.....	3
1.1. Sismología en Lima Metropolitana y Callao	4
1.2 Zonas vulnerables a sismos en Lima Metropolitana y Callao.....	6
1.2.1 Microzonificación sísmica	6
1.2.2 Vulnerabilidad en Lima Metropolitana y Callao	7
1.3 Planes actuales antes sismos de gran magnitud.....	11
1.3.1 Plan de Contingencia Nacional ante sismo de gran magnitud seguido de tsunami frente a la costa central del Perú.....	11
1.3.2 Plan de Operaciones de Emergencia de Lima y Callao	12
1.3.3 Plan de Contingencia del sector salud en casos de sismos en las regiones de Lima y Callao	14
1.4 Síntesis del diagnóstico	18
CAPÍTULO 2: PROPUESTA DE MODELO.....	20
2.1 Descripción del escenario crítico.....	20
2.1.1 Establecimientos de salud	20
2.1.2 Población damnificada	22
2.1.3 Justificación del modelo.....	26
2.2 Consideraciones para la aplicación del modelo.....	27
2.2.1 Tiempo de hospitalización.....	27
2.2.2 Tiempos límites de atención a los heridos de gravedad	27
2.2.3 Capacidad de ambulancias y trayectorias	27
2.2.4 Supuestos del modelo.....	28
2.3 Propuesta de modelo	28
2.3.1 Programación del modelo usando PULp en Python	33
2.3.2 Limitaciones del equipo de cómputo	35
2.4 Planteamiento de la heurística	36
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
4.1 Conclusiones.....	46
4.2 Recomendaciones.....	47
Referencias	48

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Historia de sismos con magnitudes superiores a 7 grados Richter en el litoral central del Perú desde el año 1500</i>	5
Tabla 2 <i>Indicadores de vulnerabilidad física</i>	8
Tabla 3 <i>Indicadores de vulnerabilidad económica</i>	9
Tabla 4 <i>Áreas funcionales y tareas</i>	14
Tabla 5 <i>Hospitales de Campaña no encontrados en la lista del MINSA (2017)</i>	21
Tabla 6 <i>PMA's no encontrados en la lista del MINSA (2017)</i>	22
Tabla 7 <i>Porcentajes de afectados por distrito</i>	24
Tabla 8 <i>Áreas funcionales agrupadas en clústeres</i>	41
Tabla 9 <i>Resumen de las ambulancias de la solución para los clústeres 1, 2 y 3</i>	42
Tabla 10 <i>Resumen de las ambulancias de la solución para los clústeres 4, 5 y 6</i>	42
Tabla 11 <i>Resumen de los pacientes atendidos de la solución para los clústeres 1,2 y 3</i>	44
Tabla 12 <i>Resumen de los pacientes atendidos de la solución para los clústeres 4, 5 y 6</i>	45
Tabla 13 <i>Ambulancia 0 del clúster 5 y escenario con capacidad 20%</i>	45



Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Frecuencia de desastres en el mundo	3
<i>Figura 2.</i> Frecuencia de desastres en el Perú	4
<i>Figura 3.</i> Frecuencia de sismos por departamentos desde el 2003 hasta el 2018	5
<i>Figura 4.</i> Microzonificación sísmica de Lima Metropolitana y Callao	7
<i>Figura 5.</i> Mapa de síntesis de vulnerabilidad de Lima Metropolitana y Callao	10
<i>Figura 6.</i> Acciones clave de preparación	12
<i>Figura 7.</i> Acciones clave de respuesta	13
<i>Figura 9.</i> Mapa de PMAs y hospitales de campaña en Lima Metropolitana y Callao	23
<i>Figura 10.</i> Cantidad de heridos con necesidades de hospitalización	24
<i>Figura 11.</i> Porcentajes de frecuencias de necesidades hospitalarias	26
<i>Figura 12.</i> Uso de solo un camino de la ambulancia k desde un hospital h hasta algún paciente j	30
<i>Figura 13.</i> La ambulancia debe utilizar algún camino que regrese a su hospital de origen	30
<i>Figura 14.</i> Un paciente es atendido por solo una ambulancia	31
<i>Figura 15.</i> Todas las ambulancias salen del nodo al que ingresan	31
<i>Figura 16.</i> El tiempo de llegada al paciente j debe ser mayor que el tiempo en el que parte del hospital anterior	32
<i>Figura 17.</i> El tiempo de visita al paciente debe estar entre la ventana de tiempo	33
<i>Figura 18.</i> Variables de decisión en Python	34
<i>Figura 19.</i> Parámetros en Python	34
<i>Figura 20.</i> Modelo programado en Python utilizando PULp	35
<i>Figura 21.</i> Modelo programado en Python utilizando PULp (continuación)	35
<i>Figura 22.</i> Metaheurística LNS	37
<i>Figura 23.</i> Heurística de inserción	38
<i>Figura 24.</i> Heurística constructiva	39
<i>Figura 25.</i> Heurística VND	39
<i>Figura 26.</i> Evolución de la función objetivo en cada iteración del clúster 3	43
<i>Figura 27.</i> Evolución de la función objetivo en cada iteración del clúster 4	43
<i>Figura 28.</i> Evolución de la función objetivo en cada iteración del clúster 5	43

INTRODUCCIÓN

Las ciudades de Lima Metropolitana y Callao son áreas expuestas al impacto de eventos naturales que junto con su vulnerabilidad, configuran escenarios de ocurrencia de desastres naturales. La evidencia muestra que la metrópoli registra elevada actividad sísmica, en particular, un terremoto podría generar impactos negativos en la infraestructura y en el caso de la población afectaría la salud e incluso provocaría pérdidas humanas.

Los tres departamentos con mayor número de sismos se encuentran Ica, Arequipa y Lima. Según INDECI (2017) en Lima Metropolitana y Callao los distritos con mayor cantidad de viviendas en situación de vulnerabilidad física y económica son San Juan de Lurigancho, Lurigancho, Puente piedra, Ventanilla y Ate, Es posible que este factor se haya dado debido al rápido crecimiento urbano no planificado y la falta de políticas de prevención de sismos aplicadas a la construcción de edificaciones. Además, estos altos niveles de vulnerabilidad y un fenómeno natural, como un sismo de gran magnitud, podrían generar un desastre natural a gran escala.

En el panorama descrito, esta tesis propone un plan logístico para el traslado de heridos desde los puestos médicos de avanzada (centros de salud con atención ambulatoria), hacia los hospitales de campaña, en donde se encuentran las camas para el tratamiento de pacientes graves y muy graves.

La tesis se organiza en los siguientes capítulos.

En el primer capítulo, se presentan los antecedentes sísmicos del Perú, el peligro sísmico de Lima Metropolitana y Callao y se presenta la vulnerabilidad de la población en ambas ciudades. Asimismo, se exponen los planes gubernamentales de respuesta ante un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao, y en particular en el sector salud. Finalmente, se elabora un diagnóstico de la metrópoli en torno a su exposición y vulnerabilidad frente a terremotos.

En el segundo capítulo, se presenta el escenario sísmico, los establecimientos de salud que se utilizarían, el estimado de población damnificada; el modelo propuesto, los supuestos y las consideraciones que se tomaron para una solución inicial del modelo; sin embargo, debido a que el problema resulta NP- difícil y no es posible resolverlo en un tiempo adecuado con los recursos computacionales actuales, se presenta el planteamiento de la heurística que se utilizará para resolver el modelo.

En el tercer capítulo, se discuten los resultados del modelo en torno a la cantidad de ambulancias necesaria para cumplir con las restricciones de tiempo y a los indicadores vinculados con el objetivo de maximizar la cantidad de pacientes atendidos. Asimismo, se señalan las ventajas y desventajas de esta solución.

Finalmente, en el cuarto capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA, PROBLEMÁTICA Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN

En Heredia (2020) se presenta una revisión de la literatura académica sobre los modelos matemáticos aplicados a la logística humanitaria la cual se toma como referencia en esta tesis. En contraste, en este capítulo se presenta el diagnóstico de Lima Metropolitana y Callao en el ámbito de los desastres naturales.

Entre los años 1980 y 2019 (figura 1), se observa una tendencia creciente en la frecuencia de los desastres naturales así como de algunos de los impactos en términos de fallecidos, afectados y daños económicos. Los impactos económicos se incrementaron en alrededor de 150%, los afectados en algo más de cinco veces y los fallecidos en torno al 180%.

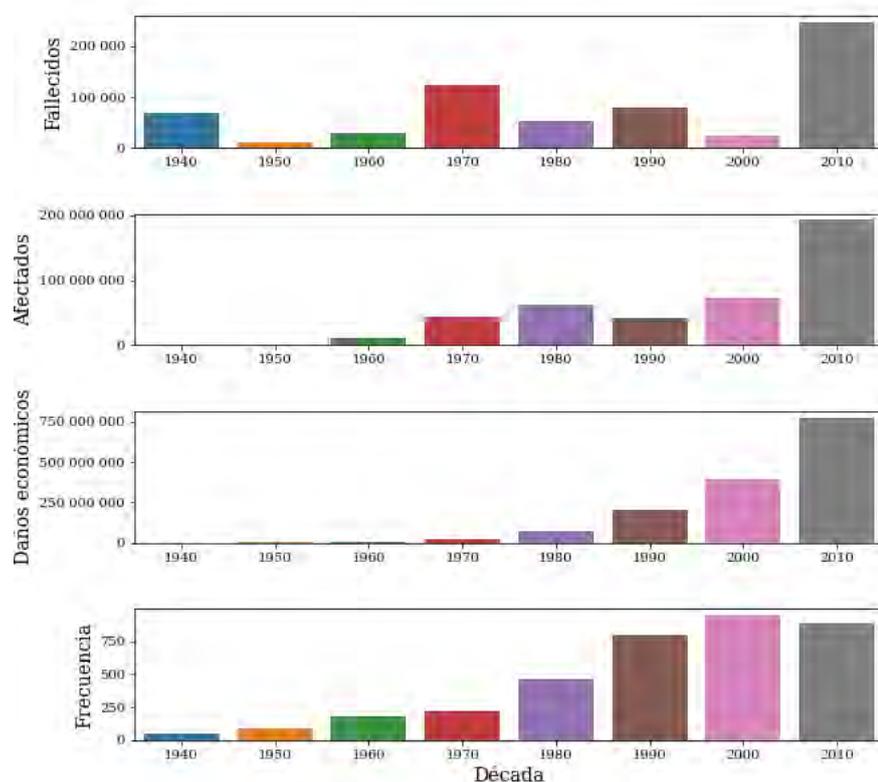


Figura 1. Frecuencia de desastres en el mundo

Elaborado con datos del Centre of Research on the Epidemiology of Disasters (CRED, s.f.)

Con respecto al Perú (figura 2), en promedio se observa un aumento en la frecuencia de desastres naturales entre los años 1940 y 2019 agrupados por décadas. En particular, resaltan por sus impactos

los siguientes desastres: el terremoto de Ancash el 31 de mayo de 1970 con más de 3 200 000 afectados; el terremoto de Juanji el 20 de marzo de 1972 con 1 500 000 afectados; la sequía en el norte del país en agosto de 1990 con 2 200 000 afectado; el Fenómeno El Niño de julio de 1992 con 1 100 000 afectados; dos olas de frío en el sur del país en julio del 2003 y junio del 2004 con más de 1 800 000 y 337 000 afectados, respectivamente; el friaje en el sur del país en abril del 2007 con más de 880 000 afectados y la inundación en Ancash en marzo del 2017 con 1 800 000 afectados. Sin embargo, sin tomar en cuenta esos eventos extremos, la figura 2 revela una tendencia creciente, tanto en la frecuencia de eventos como en la cantidad de afectados.

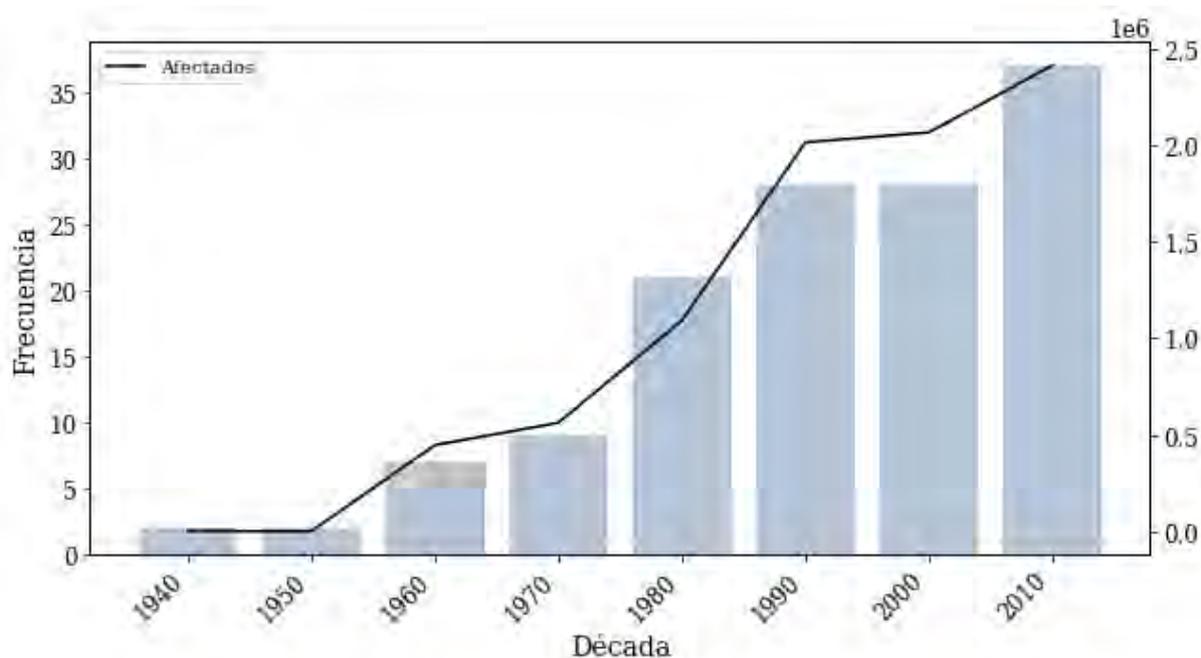


Figura 2. Frecuencia de desastres en el Perú

Elaborado con datos del CRED (s.f.)

Acerca de la actividad sísmica, a nivel departamental en el Perú, la figura 3 revela que Ayacucho, Lima e Ica son los departamentos con una frecuencia mayor de sismos. Sin embargo, Ica es el departamento con más damnificados; en particular, el terremoto del 15 de agosto del 2007 tuvo un saldo de 73 fallecidos, 10 417 viviendas destruidas y más de 2000 afectados. (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2019a)

1.1. Sismología en Lima Metropolitana y Callao

Los sismos han afectado Lima Metropolitana y Callao frecuentemente desde que se tiene registro (aproximadamente el año 1500). Varios de esos sucesos han devenido en desastres naturales; por ejemplo, el terremoto seguido de un tsunami en 1746 causó la muerte de miles de personas en la ciudad de Lima y Callao, además del derrumbe de la mayor parte de edificaciones, en esa fecha “La ciudad

contaba con 60 000 habitantes, 74 iglesias y 14 monasterios y conventos (Hales, 1752).”(Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2017, p. 7) luego de este suceso quedaron alrededor de 25 edificaciones no derrumbadas (INDECI, 2017). Los sismos que ocurren en la zona próxima al litoral del Perú tienen su origen en la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana. Estos desastres naturales de gran magnitud en ocasiones han provocado elevados daños materiales y no materiales. (Cooperazione Internazionale [COOPI], 2010). En la tabla 1 se muestra un recuento de los sismos más significativos en esta zona del litoral hasta el 2009; se observa que el sismo con mayor intensidad ocurrió en 1746 y fue también uno de los más destructivos. Durante el transcurso del presente siglo a la fecha, el sismo del 2007 tuvo severos efectos adversos en Pisco y Chincha.

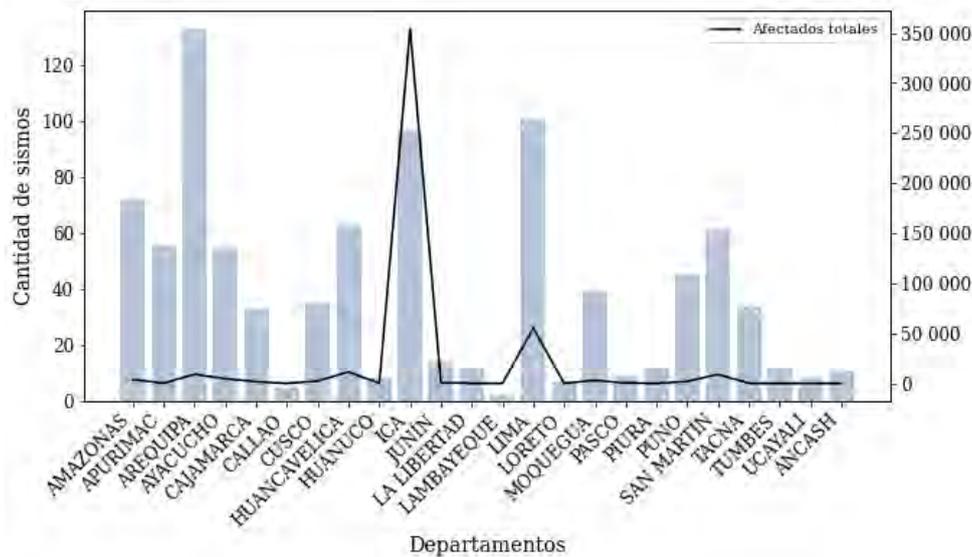


Figura 3. Frecuencia de sismos por departamentos desde el 2003 hasta el 2018

Elaborado con datos tomados de INDECI (2019a)

Tabla 1

Historia de sismos con magnitudes superiores a 7 grados Richter en el litoral central del Perú desde el año 1500

Fecha	Características del evento	Descripción de los efectos
1687, octubre 20	Magnitud: 8.0 (Richter), Intensidad: IX MM	Terremoto más devastador desde la fundación de Lima hasta 1687, sucedido por un maremoto
1746, octubre 28	Intensidad: X MM	Terremoto más fuerte en la historia de Lima, solo quedaron en pie 25 de las 3 000 casas, murió cerca del 2% de toda la población de Lima y el 96% de la población de Callao. Asimismo, fue sucedido por un tsunami que destruyó el Callao.

Tabla 1 (continuación)

Historia de sismos con magnitudes superiores a 7 grados Richter en el litoral central del Perú desde el año 1500

1904, marzo 04	Magnitud: 7.2 (Ritcher) Intensidad: VII-VIII MM	
1940, mayo 24	Magnitud: 8.2 Ms (Ritcher) Intensidad: VIII MM	5 000 viviendas colapsadas en el Callao, 179 fallecidos y 3 500 heridos en Lima, la mayor parte de viviendas colapsadas de encontraban en Chorrillos. Grandes daños, el malecón de Chorrillos se hundió por tramos, deslizamientos en Pasamayo (Carretera Panamericana Norte), sucedido por un tsunami.
1966, octubre 17	Magnitud: 7.5 (Ritcher) Intensidad: VIII-IX MM	Grietas en edificios de poca altura.
1970, mayo 31	Magnitud: 7.8 (Ritcher) Intensidad: VIII MM	El terremoto causó 65 000 fallecidos, 160 000 heridos. Además, se estimó una suma de 550 millones de US\$ en daños.
1974, octubre 3	Intensidad: IX MM	Daños presentes en construcciones de concreto armado y colapsos de estructuras de adobe.
2007, agosto 15	Magnitud: 7.0 Ritcher, 7.9 Mw Intensidad MM:	Numerosas muertes, daños estructurales y colapsos en viviendas y establecimientos de salud.

Nota. Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES, 2009).

1.2 Zonas vulnerables a sismos en Lima Metropolitana y Callao

El riesgo sísmico se puede analizar con las estructuras de las edificaciones, los materiales y el comportamiento dinámico de los suelos obtenido mediante ensayos de laboratorio (Centro de Estudios y Prevención de Desastres, [CENEPRED], 2017)

1.2.1 Microzonificación sísmica

Existen diferentes factores los cuales indican la vulnerabilidad hacia un sismo, uno de ellos es la exposición de los habitantes al peligro sísmico. Este factor se cuantifica mediante estudios de microzonificación sísmica, el cual clasifica las zonas según el comportamiento geotécnico y sísmico del suelo. A continuación se reseñan de acuerdo con el Cooperazione Internazionale (2010, p. 16-17):

La zona I es la zona más segura, es decir, no se espera un incremento del peligro sísmico, esta zona posee suelos rocosos y estratos de grava. En la zona II se espera un incremento moderado del peligro sísmico y está conformada por materiales arenosos finos o alternancias de suelos compactos y no compactos. En la zona III se espera un incremento severo del nivel de peligro sísmico, esta zona posee un suelo arcilloso altamente plástico. En la zona IV se espera un incremento alto del nivel de peligro sísmico, ya que es posible que ocurran deslizamientos, caídas de rocas, lodos y derrumbes los cuales

están condicionados con las lluvias ocurridas en el lugar. En la figura 4, se muestra el mapa de microzonificación sísmica de Lima Metropolitana y Callao.

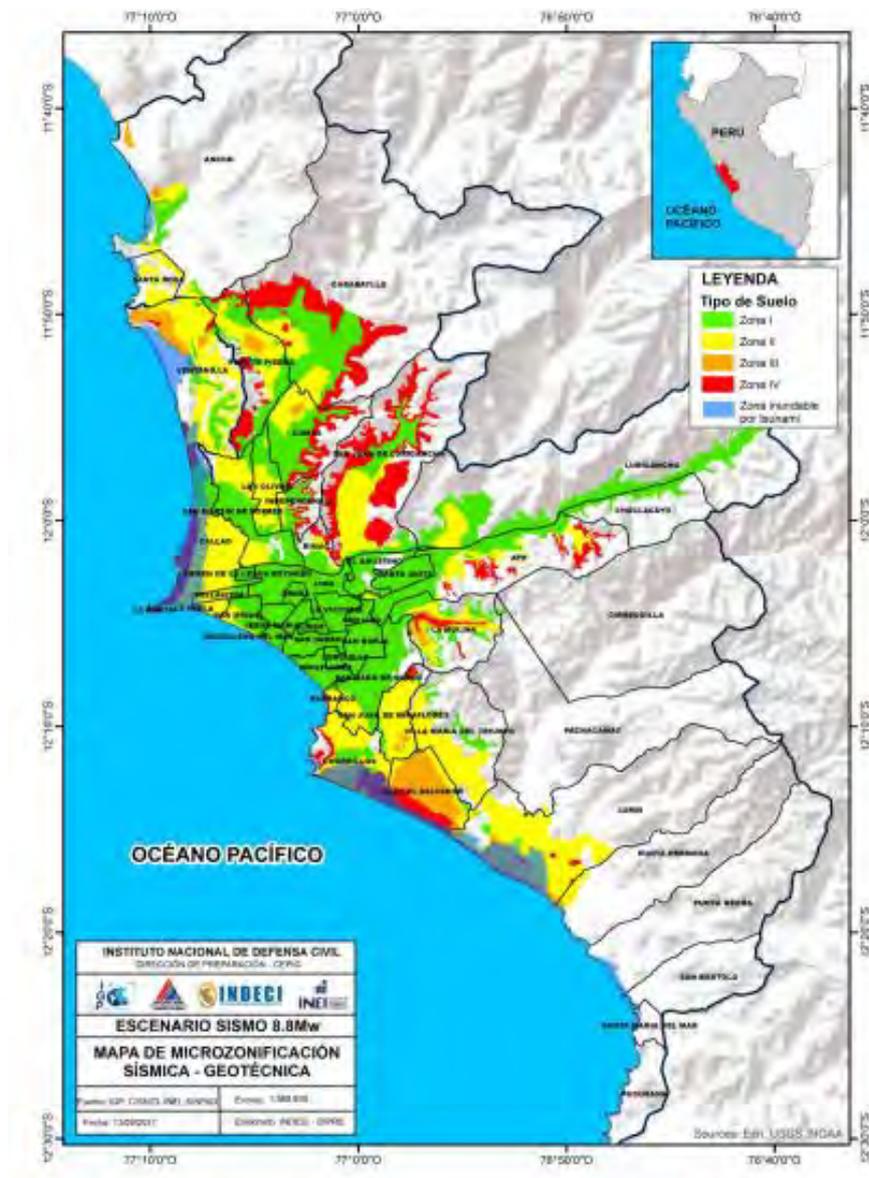


Figura 4. Microzonificación sísmica de Lima Metropolitana y Callao Tomado de INDECI (2017, p. 21).

Asimismo, en la figura 5 se observa que los distritos más propensos a sufrir daños debido a sismos, de acuerdo con los criterios de la microzonificación, son varias zonas de San Juan de Lurigancho, Carabayllo, Comas, Independencia y Puente Piedra en Lima Norte; en el centro Rímac; Ate en el Este y La Molina; San Juan de Miraflores y Villa El Salvador Chorrillos en Lima Sur; asimismo el Callao; esos distritos contienen zonas tipo III o IV y en particular tiene zonas inundables por tsunami.

1.2.2 Vulnerabilidad en Lima Metropolitana y Callao

Para evaluar la vulnerabilidad de la población, INDECI (2017) toma en cuenta la vulnerabilidad física, económica y social. La vulnerabilidad física se determina según el tipo de techo y tipo de pared; la vulnerabilidad social con la densidad poblacional a nivel de manzana y la económica según el tipo de piso y el tipo de servicios higiénicos. En la tabla 2 se muestran los cuadros proporcionados por el INDECI (2017) para el cálculo de la vulnerabilidad, en donde se observan los indicadores evaluados, sus pesos ponderados y la calificación dependiendo el tipo de estructura.

Tabla 2

Indicadores de vulnerabilidad física

N°	Tipo de pared	Ponderado: 0.7	Tipo de techo	Ponderado: 0.3
1	Ladrillo	2	Concreto armado	1
2	Piedra y sillar	3	Madera	3
3	Adobe y tapia	4	Teja	3
4	Quincha	2	Calamina, fibra cemento	4
5	Piedra con barro	4	Caña / Estera con barro	4
6	Madera	1	Estera	4
7	Estera	1	Paja, palmera	4
8	Otro	3	Otro	4

Nota. Tomado de INDECI (2017, p. 24).

Según el Censo Nacional proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, s.f.), cerca del 76% de los techos de Lima Metropolitana y Callao son de material noble, el 21% son calaminas o tejas y casi el 3% son de material precario. Sin embargo, este último porcentaje corresponde a 65 878 viviendas de las cuales el mayor número se encuentran en los distritos de San Juan de Lurigancho con 6 362 viviendas; Puente Piedra con 4 823 viviendas; Ventanilla con 4 235 viviendas y Ate con 4 411 viviendas.

Por otro lado, a partir de los datos de INEI (s.f.) se obtiene las siguientes evidencias sobre el tipo de material utilizado para las paredes: se observa que el 94% son de material noble, el 2.6% son de adobe o tapia y el 3% corresponden a material precario que corresponde a 69 477 viviendas tienen paredes de material precario. El distrito con mayor cantidad de viviendas con paredes precarias es San Juan de Lurigancho con 11 906 viviendas, seguido de Villa María del Triunfo con 9 506 viviendas.

Tanto por el tipo de techo, como de paredes, la evidencia previa sugiere que San Juan de Lurigancho es uno de los distritos con mayor cantidad de viviendas precarias.

En la tabla 3 se muestra los indicadores que se utilizaron para medir la vulnerabilidad económica y la clasificación de las mismas en donde se observan los indicadores evaluados, sus pesos ponderados y la calificación dependiendo el tipo de estructura.

Tabla 3

Indicadores de vulnerabilidad económica

N°	Tipo de piso	Ponderado: 0.7	Tipo de servicios higiénicos	Ponderado: 0.3
1	Parqué o madera pulida	1	Red pública dentro	1
2	Láminas asfálticas, vinilos, similares	2	Red pública fuera	2
3	Losetas	2	Pozo séptico	3
4	Madera	2	Pozo ciego o negro / letrina	4
5	Cemento	3	Río, acequia, canal	4
6	Tierra	4	No tiene	4
7	Otro	4		

Nota. Tomado de INDECI (2017, p. 25).

Asimismo, de los datos de INEI (s.f.) se obtiene las siguientes evidencias acerca de la vulnerabilidad económica: el material predominante en los pisos el 46% de viviendas tiene pisos de parqué, losetas o similares; el 48.13% cuenta con pisos de cemento y el 6% de tierra. Por otro lado, la cantidad de viviendas en Lima Metropolitana y Callao con piso precario es 144 569 y la media es 2 891 viviendas por distrito; sin embargo, algunos distritos con más de 10 000 viviendas con pisos precarios son San Juan de Lurigancho con 26 349, Puente Piedra con 13 054, Carabayllo con 12 757, Ate con 12 790 y Ventanilla con 10 315. Asimismo, en el tipo de servicios higiénicos se tiene que casi el 90% presentan alcantarillado por red pública, alrededor del 3.5% pozo séptico, un 6% pozo ciego o negro y cerca del 1% no tiene servicios higiénicos lo que corresponde a 21 083 viviendas. La media de viviendas sin servicios higiénicos es de 422 viviendas por distrito; sin embargo, algunos distritos tienen más del doble de viviendas en esta situación. Los distritos con mayor cantidad de viviendas en dicha situación son Lurigancho con 3 649, San Juan de Lurigancho 2 868 y Puente Piedra con 2 593.

En relación con lo anterior, la figura 5 ilustra el mapa de Lima Metropolitana y Callao con zonas identificadas según los índices de vulnerabilidad previamente discutidos.

Según lo expuesto anteriormente, San Juan de Lurigancho sería uno de los distritos más vulnerables de Lima, tanto por los criterios geotécnicos y sísmicos del suelo estudiados en la microzonificación sísmica, como por la vulnerabilidad física y económica, ya que es uno de los distritos con mayor cantidad de viviendas vulnerables en todos los indicadores, excepto en el indicador del tipo de techo.

Asimismo, también muestran altos índices de vulnerabilidad los distritos de Puente Piedra, Comas, Ventanilla, Ate y Villa María del Triunfo, los cuales tienen una alta cantidad de viviendas vulnerables en al menos dos de los indicadores de vulnerabilidad, ya sea física o económica.

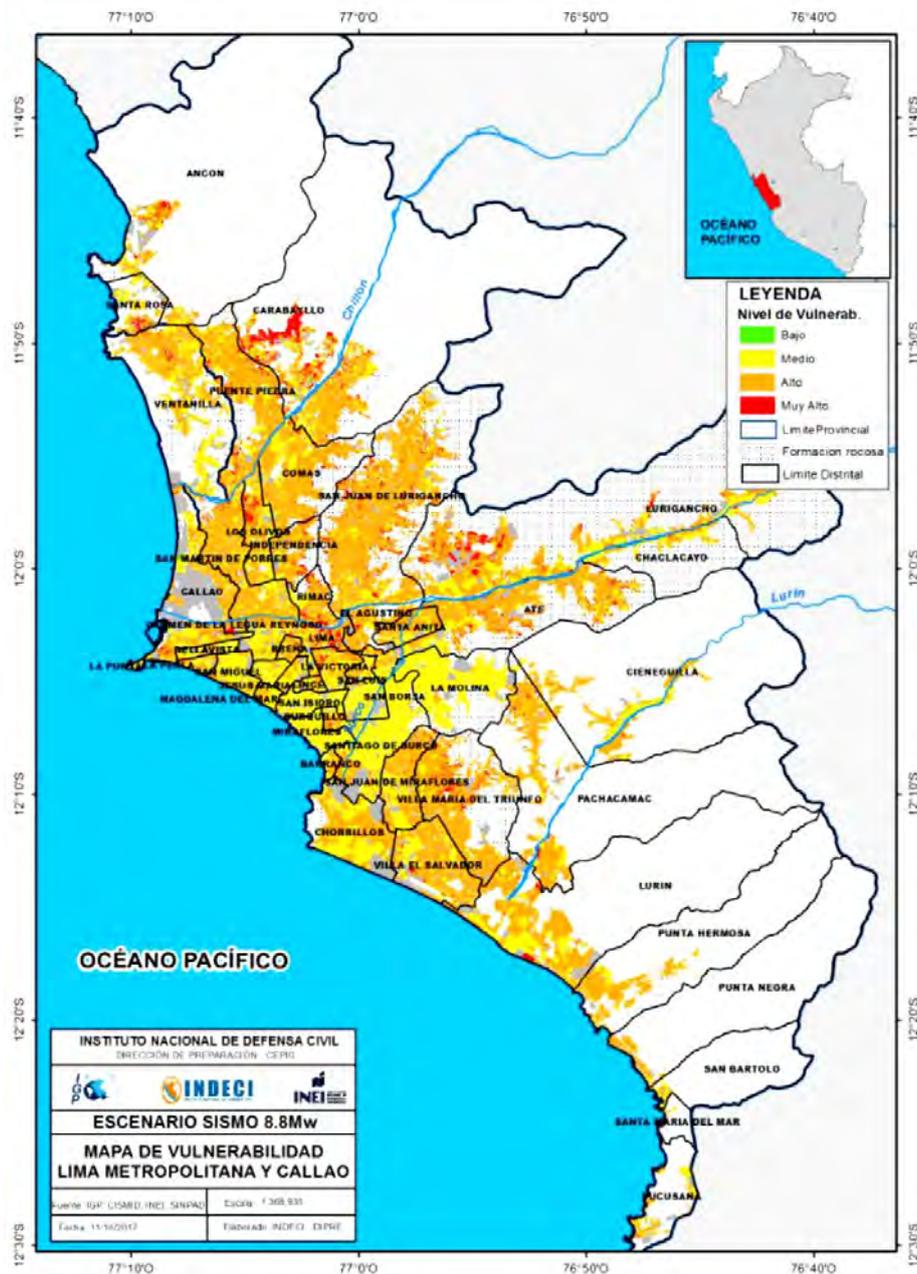


Figura 5. Mapa de síntesis de vulnerabilidad de Lima Metropolitana y Callao

Tomado de INDECI (2017, p. 26).

1.3 Planes actuales antes sismos de gran magnitud

Debido a la alta vulnerabilidad y al alto riesgo de un episodio sísmico de gran magnitud, se expone a continuación las estrategias empleadas por el Gobierno del Perú para afrontar y superar el desastre, las cuales se encuentran en el Plan de Contingencia Nacional Ante Sismo de Gran Magnitud Seguido de Tsunami frente a la Costa Central del Perú y el Plan de Operaciones de Emergencias (POE) de Lima Metropolitana (INDECI, 2011). Asimismo, las acciones del sector salud ante estos eventos se encuentran en el Plan de Contingencia del sector salud en casos de sismos en las regiones de Lima y Callao (MINSA, 2016). A continuación se explicarán los planes mencionados.

1.3.1 Plan de Contingencia Nacional ante sismo de gran magnitud seguido de tsunami frente a la costa central del Perú

Este plan de contingencia permite realizar las acciones de respuesta rápidamente ante un sismo de gran magnitud seguido de un tsunami frente a la costa central a nivel nacional, ya que asigna los roles y actividades correspondientes a las entidades gubernamentales encargadas, asimismo, dirige el flujo de información entre las mismas. A continuación, se presentarán los procedimientos principales.

1. Emisión de alerta

En este proceso, el Centro Nacional de Alerta Tsunami (CNAT) emite la alerta, la cual es el detonante para activar los demás procesos. Cabe resaltar que la información sísmica es analizada con el fin de que sea transmitida a la población y a los órganos responsables de las operaciones, es decir, los diferentes centros de operaciones de emergencia. (INDECI, 2019b)

2. Movilización y despliegue de recursos para la alerta

Este proceso está a cargo del INDECI y los gobiernos regionales y locales, los cuales evalúan los recursos necesarios, ya sean materiales, mano de obra o medios de transporte; en el foco del desastre y los movilizan hacia el mismo. Una vez culminada la respuesta, se replegarán los recursos transportados hacia sus respectivas áreas de origen. Cabe resaltar que las acciones tomadas por las organizaciones nacionales anteriormente mencionadas deben estar en sus respectivos planes de contingencia. (INDECI, 2019b)

3. Acciones de respuesta

Este proceso es realizado por todas las entidades que participan en el Sistema Nacional de Defensa Civil (SINADECI) y tiene el fin de asegurar las necesidades básicas de la población afectada (INDECI, 2019b). Se divide en tres fases: activación e intervención inicial, primera respuesta y respuesta complementaria. En la primera fase, los organismos activan los planes de contingencia

correspondientes, actualizan la información y evalúan los daños para realizar los requerimientos de recursos necesarios en el foco del desastre. En la segunda fase, se despliegan los recursos necesarios para la atención de los damnificados y también se facilita la recepción de ayuda humanitaria extranjera. En la tercera fase, se incluyen acciones como remoción de escombros, control de vectores, así como las evaluaciones de los daños causados por el desastre. Debido a que en la fase anterior se contuvo la mayoría de los estragos más urgentes del episodio sísmico, como son los damnificados y la logística para poder atenderlos; esta fase se enfoca en otros impactos del desastre, como la interrupción del suministro de agua potable, las ruinas y escombros dejados por el siniestro, inundaciones de aguas servidas debido a las grietas ocasionadas por el sismo y otros. En esta etapa también se ejecutan las actividades relacionadas a la gestión de la recepción de la ayuda humanitaria enviada desde el exterior.

1.3.2 Plan de Operaciones de Emergencia de Lima y Callao

El POE de Lima Metropolitana y Región Callao tiene el objetivo de dirigir las actividades relacionadas con la respuesta frente a emergencias o desastres para preservar la vida, propiedad y medioambiente en las circunstancias del desastre. Este plan está dirigido a las autoridades que conforman el SINADECI; asimismo, contempla la coordinación entre las autoridades a nivel territorial, articulaciones con otros planes e instrumentos de planificación y facilita la coordinación con el sector privado, comunidades y otros grupos de interés (INDECI, 2011). Asimismo, El POE cuenta con las fases operativas que a continuación se exponen.

1. Proceso de preparación

Este proceso engloba las medidas que se deben tomar antes del desastre para lograr una respuesta efectiva cuando suceda el evento, por lo que se efectúan las siguientes acciones planteadas por INDECI (2011).



Figura 6. Acciones clave de preparación

Tomado de INDECI (2011, p. 62).

2. Proceso de respuesta

Este proceso corresponde a las acciones implementadas inmediatamente después de ocurrido el desastre y tienen el propósito de salvar vidas, proteger los bienes y el ambiente, preservar la estructura social, económica y política del territorio. A continuación se muestran las acciones clave para la respuesta propuestas por INDECI (2011).

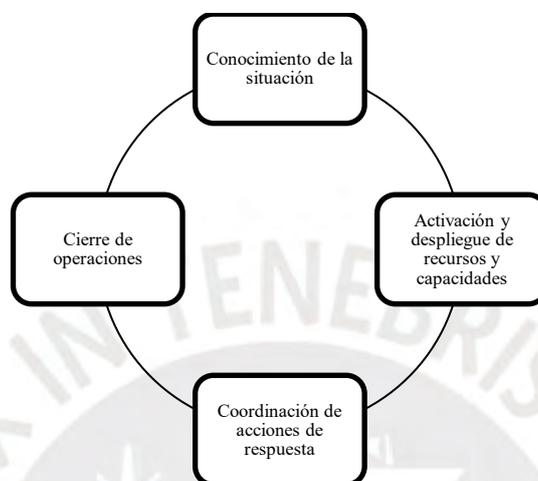


Figura 7. Acciones clave de respuesta

Tomado de INDECI (2011, p. 63).

3. Proceso de rehabilitación

Este proceso corresponde al último paso en las operaciones de emergencia y plantea la recuperación de las condiciones iniciales antes del desastre; por lo que INDECI (2011) incluye las siguientes actividades clave: evaluación de daños, habilitación de carreteras, líneas vitales y servicios básicos, albergues temporales, etc.

En la tabla 4 se muestran las áreas funcionales, las cuales efectúan las acciones planteadas en los procesos anteriores y están lideradas por los ministerios y cuentan con el apoyo de instituciones del Estado especializadas en los temas de correspondientes a cada área.

Finalmente, se reseña a continuación el plan de contingencia relacionado al sector salud vinculado al área funcional II, el cual relata los procedimientos y actividades a ejecutar por el sector salud.

Tabla 4

Áreas funcionales y tareas

Áreas funcionales	Tareas
Área Funcional I Rescate y Seguridad	Se encarga de buscar, rescatar y evacuar a los afectados, asegurar las medidas de seguridad y controlar emergencias que podrían surgir, como incendios y exposición de materiales nocivos.
Área Funcional II Salud	Se encarga de la atención sanitaria de los afectados, desde el desastre hasta después en las secuelas de los pacientes.
Área Funcional III Asistencia Humanitaria	Se encarga de brindar albergue y asistencia alimentaria y no alimentaria a los damnificados, así como reunificación familiar y protección a grupos vulnerables
Área Funcional IV Servicios generales, Hábitat y Medio Ambiente	Se encarga de monitorear los eventos naturales inducidos por el desastre, los riesgos que puedan devenir de este, además, evalúan los daños en las construcciones y restablecen los servicios básicos para el funcionamiento de la sociedad (agua, saneamiento, transporte, comunicaciones y energía)
Área Funcional V Dirección y manejo de la emergencia	Se encarga de la planificación integral de la recuperación ante el desastre, es decir, análisis de necesidades, coordinaciones con entidades internacionales, gubernamentales y no gubernamentales para la distribución de ayuda humanitaria a los afectados, publicación de la información sobre el desastre y la planificación de la recuperación social y económica de la zona afectada.
Área Funcional VI Logística y recursos para las operaciones y toma de decisiones	Se encarga de la administración de almacenes, manejo de donaciones, recursos e inventario de los bienes destinados para la ayuda humanitaria

Nota. Tomado de (INDECI, 2011, p. 68).

1.3.3 Plan de Contingencia del sector salud en casos de sismos en las regiones de Lima y Callao

El Ministerio de Salud (MINSA, 2016) formuló un plan de contingencia para el sector de salud para asegurar la atención médica en caso de sismos de gran magnitud. Este plan contempla los riesgos de la infraestructura de salud, organización territorial del sector salud y los entes gubernamentales y no gubernamentales que efectuarán los procedimientos. Como el plan pretende cubrir las necesidades de toda la región de Lima y Callao, en dicho documento se divide todo este territorio en 12 secciones, las cuales se muestran en la figura 8.

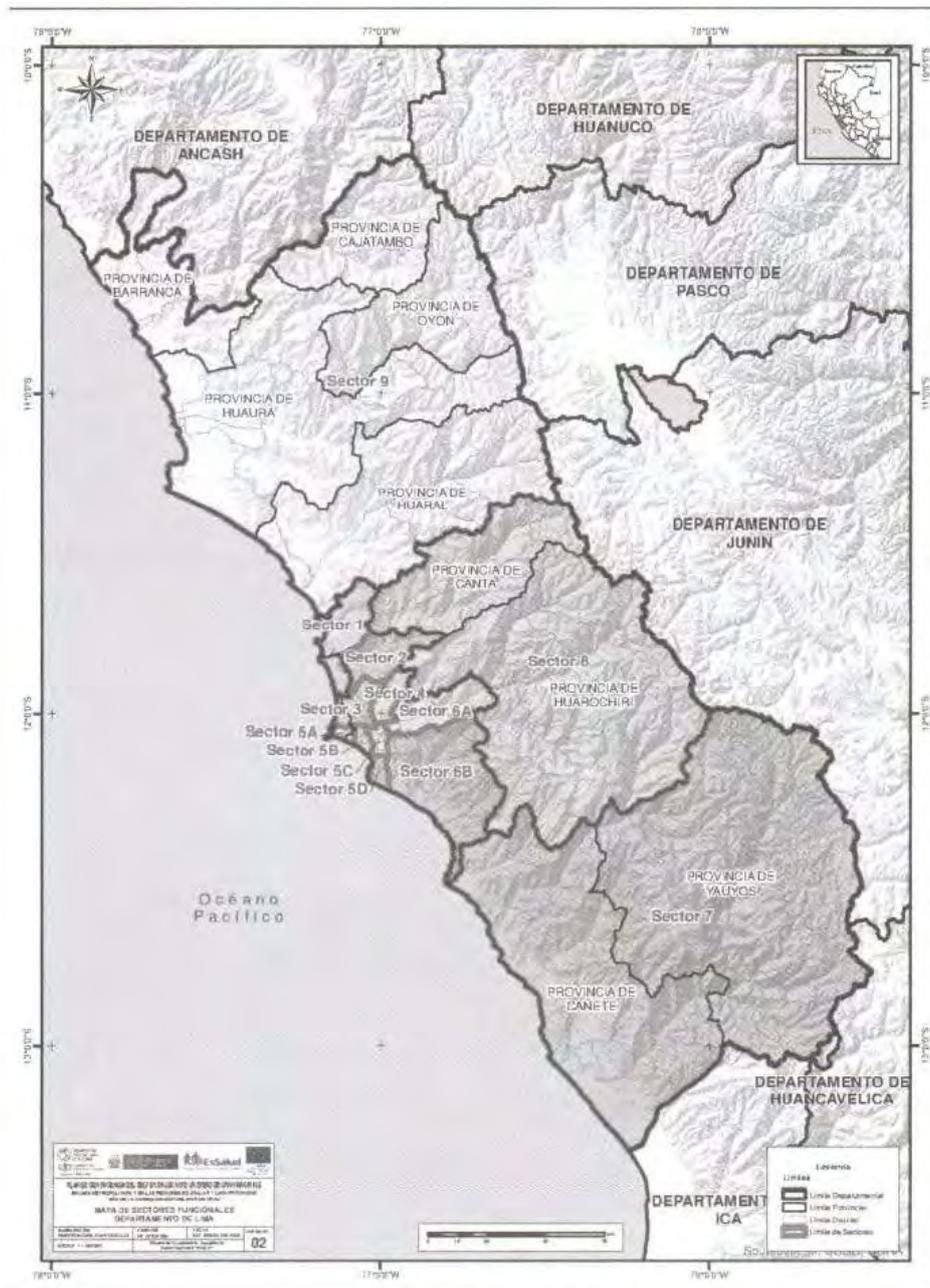


Figura 8. Mapa de secciones funcionales del departamento de Lima
 Tomado de MINSA (2016, p. 40).

A continuación, se reseña los procedimientos descritos en ese plan de contingencia.

1. Alerta

Este procedimiento presenta las primeras actividades ante el desastre, las cuales incluyen la coordinación entre el MINSA, EsSalud, FFAA, PNP y entidades privadas para la evacuación de estructuras con daños severos, movilización de recursos humanos para la atención de damnificados y el funcionamiento regular de los servicios de agua y luz en los establecimientos de salud. Cabe resaltar

que este procedimiento debe dar inicio a estas coordinaciones y a la respuesta del sector salud ante un escenario sísmico de gran magnitud mediante la declaración de alerta roja emitida por la alta dirección del Ministerio de Salud dentro de las cuatro horas posteriores al desastre (MINSA, 2016).

2. Coordinación

Este procedimiento tiene como propósito reunir los esfuerzos de las entidades gubernamentales y no gubernamentales para solicitar ayuda nacional e internacional para la obtención de los equipos médicos de emergencia. Asimismo, se evalúa la lista de medicamentos e insumos necesarios para el llamamiento de ayuda.

3. Movilización

En esta parte del plan de contingencia, se moviliza la fuerza laboral de salud, los equipos biomédicos y mobiliario desde los hospitales colapsados hacia los Equipos Médicos de Emergencia (EMT) o los hospitales de campaña y se movilizan los medicamentos, vacunas e insumos médicos de los hospitales evacuados hacia almacenes provisionales con las condiciones adecuadas para guardarlos y luego trasladarlos hacia los centros médicos que las necesiten. En el anexo 1 se muestra la lista de los 102 hospitales de campaña.

4. Respuesta

Este procedimiento comprende las siguientes acciones establecidas por MINSA (2016), las cuales se relacionan con la atención de damnificados en la respuesta ante el desastre y se reseña a continuación.

- Operación de puesto médico de avanzada.
- Atención prehospitalaria.
- Atención hospitalaria.
- Coordinación de equipos médicos de emergencia.
- Operación de puesto médico de avanzada

Este procedimiento se encarga de poner en marcha los PMA (Puestos Médicos de Avanzada) y es realizado por cada uno de los puestos, los cuales asegurarán la atención y clasificación en el triaje SHORT (Sale caminando, Habla sin dificultad, Obedece órdenes sencillas, Respira, Taponar hemorragias) de los damnificados. Este triaje clasifica a las víctimas en cuatro colores, los cuales son negro, rojo, amarillo y verde, ordenadas de mayor severidad a menor severidad; en particular, el color negro corresponde a las víctimas fallecidas. Según Pérez, et al. (2022), los PMA son centros provisionales generalmente ubicados en las inmediaciones del desastre, acondicionados sanitariamente y cuentan con personal cualificado para realizar la primera atención a los heridos.

El PMA también se encarga de la coordinación de traslado de víctimas con clasificación rojo o amarillo a los establecimientos de salud correspondientes. (MINSA, 2016). La relación de los 36 PMAs a los que se dirigirán las víctimas, se encuentran en el anexo 2.

- Atención prehospitalaria

En esta parte del plan, el MINSA coordina con los hospitales y clínicas para saber la disponibilidad de camas, UCI y otros servicios críticos¹. Además, se realiza el envío de ambulancias para el traslado de las víctimas a los hospitales o a los PMA. El STAE² de EsSalud solicita el apoyo de otras organizaciones de salud para el envío de ambulancias y la aplicación del triaje SHORT en el lugar del desastre (MINSA, 2016)

- Atención hospitalaria

Este procedimiento hace énfasis en la atención de víctimas del sismo en las primeras 72 horas después de ocurrido el desastre y se aplica en los hospitales, clínicas, institutos y servicios médicos. Las acciones principales comprenden la evaluación de las víctimas bajo el sistema de triaje MANCHESTER por médicos y SHORT por personal no médico; la atención de las víctimas considerando las prioridades evaluadas por los triajes; mantener al menos el 20% de camas libres en emergencia; realizar acciones para aumentar el número de camas y el espacio de atención de las víctimas; evaluación de las edificaciones de salud, entre otros. Si la edificación no resulta segura en la evaluación, se implementa el plan de evacuación del establecimiento recogiendo los bienes que se puedan rescatar. Asimismo, se pone a disposición ambulancias equipadas para 24 a 48 horas, se asegura el stock de medicamentos e insumos médicos y las reservas de agua, combustible y alimento (MINSA, 2016).

- Coordinación de equipos médicos de emergencia

En esta parte del plan se establecen los lineamientos para la obtención de los EMTs³ nacionales e internacionales. Cabe resaltar que este procedimiento comienza dentro de las 12 horas posteriores a la ocurrencia del sismo. Asimismo, en este proceso de coordinación se publica las necesidades de los EMT, la movilización, instalación y puesta en marcha de los mismos, así como la supervisión para el cumplimiento de las buenas prácticas de los EMT (MINSA, 2016).

5. Continuidad operativa

El ámbito de la continuidad operativa se refiere a la continuación de los procesos de las entidades de salud después del siniestro; por ejemplo, la atención de pacientes en un hospital después de un sismo.

¹ UCI: Unidad de cuidado intensivo.

² STAE: Sistema de transporte asistido de emergencia.

³ EMT: Equipos médicos de emergencia.

Para asegurar la continuidad operativa se realizan acciones concernientes a la evaluación de los daños en las instalaciones. Una vez realizada esta evaluación se decide si se debe evacuar, si es así se trasladan los equipos y mobiliarios a sitios alternos, se reasigna al personal esencial para responder a la emergencia, se valora el *stock* de medicamentos e insumos médicos y se realizan requerimientos de los faltantes. De esta manera se asegura la continuidad operativa de los establecimientos médicos.

6. Intervenciones de salud pública

Este procedimiento tiene como objetivo reducir la aparición y propagación de enfermedades relacionadas indirectamente con el sismo, por lo que cuenta con una parte de vigilancia epidemiológica que se encarga de determinar los riesgos potenciales epidémicos, reforzar la capacidad de los laboratorios de salud pública y vigilar el desenvolvimiento de los lugares observados como albergues, ollas comunes y otros. Asimismo, también integran la vigilancia de la calidad de agua en albergues, comunidades y establecimientos de salud, manejo de residuos sólidos, vigilancia de vectores de enfermedades, etc. Es importante también resaltar que la salud mental es un factor importante de mortalidad en víctimas de desastres naturales (Bartels & VanRooyen, 2012), por lo que este procedimiento integra este tipo de ayuda para los damnificados, entre otros tipos de ayuda (MINSA, 2016).

1.4 Síntesis del diagnóstico

A modo de síntesis de este capítulo, Lima Metropolitana y Callao presentan un vasto historial de fenómenos sísmicos debido al proceso de subducción de las placas tectónicas; es decir, el desplazamiento de las placas oceánicas debajo de las placas continentales, lo que ocasiona movimientos telúricos (INDECI, 2017). Asimismo, Tavera (2021) afirma que el área del litoral central de la costa ha acumulado esfuerzos desde 1746; por lo que la posibilidad de un sismo de gran magnitud es muy grande. Sumada a esta geografía, ambas ciudades tienen distritos con elevada vulnerabilidad como San Juan de Lurigancho, Lurigancho, Villa María del Triunfo, Puente Piedra y Ventanilla. Esta combinación de exposición a fenómenos naturales, alto riesgo y vulnerabilidad, evidencia que un evento natural como un terremoto podría ocasionar impactos en términos de damnificados, pérdidas de vidas humanas y daños económicos. En particular, para el caso de los damnificados, se requiere un traslado eficiente hacia los hospitales con el propósito de atenderlos e incluso salvar sus vidas.

Con base en el diagnóstico elaborado en este capítulo, esta tesis se ubica en las áreas funcionales II salud del POE para el área metropolitana de Lima y la región del Callao, y aborda el problema del traslado de los damnificados hacia los hospitales. Como se expuso anteriormente, algunos de los factores que podrían dificultar la supervivencia de los damnificados son la alta vulnerabilidad de la población y la respuesta tardía de los planes gubernamentales para enfrentar las situaciones posdesastre. En particular, en el sismo de Pisco 2007, el SINADECI no contaba con un plan de contingencia ante

sismos, las autoridades regionales desconocían los planes de participación y prevención de desastres implementados por INDECI y la magnitud del siniestro dificultó las coordinaciones y las operaciones de respuesta. Cabe resaltar que las dificultades de coordinación también se trasladaron dentro del sector salud, las cuales impidieron el funcionamiento eficiente de algunos establecimientos médicos; sumado a esto se reportaron faltas de recursos para la atención de pacientes, problemas en la evacuación de pacientes por falta de triaje médico, falta de equipamiento básico para emergencias y más del 60% del personal médico damnificado producto del sismo (INDECI, 2009). Si bien ahora se cuenta con planes de contingencia, tanto para los centros de salud y nosocomios (MINSA, 2016) como para las ambulancias (MINSA, 2019), las dificultades anteriores no están exentas de ocurrir en un escenario de desastre en Lima Metropolitana y Callao. Por lo que la implementación de un plan eficiente para el traslado de pacientes resulta una tarea determinante para el éxito de la respuesta ante el desastre.

Para enfrentar los impactos de un terremoto en la metrópoli, diferentes instancias del Estado Peruano han elaborado planes de acción para la recuperación del funcionamiento de la sociedad en caso de un desastre de un terremoto y otros desastres naturales. Si bien estos planes mencionan a los entes coordinadores y ejecutores de las tareas relacionadas a la atención del desastre y algunos tiempos límite de ejecución; no contemplan algunos lineamientos de acciones específicas, como es el caso de la movilización de los pacientes de los PMAs hacia los hospitales de campaña, o la movilización de bienes necesarios para la atención de pacientes desde los almacenes hacia los hospitales, ni tampoco se esboza la necesidad de un enfoque científico para esas tareas. En ese contexto y complementando lo previamente indicado sobre la ubicación de esta tesis en las áreas funcionales II salud del POE para Lima y Callao; esta tesis se enfoca en el ámbito sanitario de la respuesta ante el desastre, esencialmente, en el traslado de víctimas graves y muy graves, según el triaje SHORT, hacia los hospitales de campaña, en donde podrán recibir la atención correspondiente.

CAPÍTULO 2: PROPUESTA DE MODELO

2.1 Descripción del escenario crítico

El Perú se encuentra dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que resulta proclive a una intensa actividad sísmica; asimismo, Tavera (2021) afirma que existe un silencio sísmico de 275 años en el área costera central; debido a la geofísica del lugar, se espera un sismo de gran magnitud, 8.8M de magnitud similar al del año 1746, en donde falleció el 10% de la población de Lima Metropolitana y Callao. Como se expuso en el capítulo 1, la metrópoli revela altos valores de vulnerabilidad física y económica. Asimismo, según el Censo del INEI(s. f.) más de 65 000 viviendas poseen techos de material precario y más de 69 000 poseen paredes de material precario, además, cerca de 21 000 no poseen servicios higiénicos. Además, Tavera (2021) afirma que solo cerca del 30% de la población en zonas urbanas de Lima participaba en simulacros de sismos; lo que aumentaría la vulnerabilidad de la población ante los sismos.

En ese contexto, el Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES, 2009) realizó un estudio para simular el impacto de un sismo de 8.0Mw de magnitud y el tsunami que le sucedería. En dicho escenario PREDES (2009) estima 51 019 fallecidos y 686 105 heridos, más de 200 000 viviendas destruidas y más de 348 328 inhabitables. Cabe resaltar que acerca del 20% de los colegios y 7% de estaciones sufrirían daños sustanciales debido al tipo de suelo que poseen.

2.1.1 Establecimientos de salud

En el modelo de esta tesis se usa la lista de hospitales de campaña, hospitales públicos y clínicas asociadas, elaborada por MINSA (2016) y que abarca a todo el departamento de Lima; sin embargo, el alcance geográfico de esta tesis es Lima Metropolitana y Callao, por lo que se utilizará la información de las áreas 1, 2, 3, 4, 5a, 5b, 5c, 6a y 6b (información adicional en el anexo 1).

Por otro lado, en la lista de hospitales de campaña solo figuran los nombres de las instituciones, por lo que la información faltante para realizar esta tesis, como las coordenadas y la cantidad de camas se obtuvo del “Listado de Instituciones Prestadoras de Salud” proporcionada por MINSA (2017); sin embargo, existen 28 centros de salud públicos, que corresponden a hospitales destinados a atender a la población militar, y privados no registrados en esa base de datos, por lo que se buscaron a través en Google Maps. En la tabla 5 se muestra una lista de los centros de salud faltantes y sus respectivas coordenadas.

Tabla 5

Hospitales de Campaña no encontrados en la lista del MINSA (2017)

Área	Hospital	Coordenadas	
		Norte	Este
5a	Hospital Médico Naval Cirujano Mayor Santiago Távara	-77.092859	-12.0598824
5a	Hospital Nacional Daniel Alcides Carrión	-77.124385	-12.0621416
5b	Clínica Delgado Medic Ser	-77.0351468	-12.1132092
5b	Clínica San Felipe	-77.0699277	-12.0861808
5b	Hospital Central FAP	-77.0320753	-12.103794
5b	Hospital Militar Central CRL Luis Arias Schreiber	-77.0633616	-12.0862071
5d	Clínica Complejo Hospitalario de Chorrillos	-77.0207239	-12.1746022
6b	Hospital María Auxiliadora	-76.9605346	-12.1610127
3	Clínica San Vicente	-77.0837681	-12.0311595
3	Hospital PNP Augusto B. Leguía	-77.0358783	-12.0353845
5a	Hospital de Rehabilitación del Callao	-77.1354249	-12.0632001
5a	Clínica Bellavista- Red Auna	-77.0989366	-12.0577337
5a	Hospital Alberto Leopoldo Baton Thompson	-77.1098758	-12.048778
5b	Clínica Santa Mónica	-77.0352737	-12.0886092
5b	Hospital Suárez Angamos	-77.0302625	-12.113514
5b	Clínica Avendaño	-77.0267312	-12.1311084
5b	Clínica MEDAVAN	-77.0595108	-12.0891092
5c	Clínica Internacional (Sede San Borja)	-77.0112114	-12.0930224
5c	Clínica Maison De La Santel	-77.0678069	-12.0841484
5c	Clínica Quirúrgica Santa María	-77.0284836	-12.1033774
5c	Clínica Vesalio	-77.009614	-12.1062909
5c	Clínica Virgen Milagrosa	-77.0071251	-12.1168546
5d	Clínica Maison De La Santel	-77.0678069	-12.0841484
5d	Clínica Guadalupe	-77.0259261	-12.167025
5d	Hospital Las Palmas	-77.00355	-12.1529228
6a	Clínica Nuestra Señora del Sagrado Corazón	-76.9076543	-12.028689
6b	Clínica San Pablo-Sede Villa el Salvador	-76.9466834	-12.2176603

Los centros de salud de la tabla 5 no cuentan con datos sobre el número de camas; por lo que se tomará el promedio de camas por establecimiento de salud el cual se obtuvo del documento “Infraestructura

del sector salud por tipo de establecimiento” INDECI (s.f.) y del número de camas hospitalarias por habitante según MINSA (s.f.), considerando solo los hospitales y centros de salud y la cantidad total de camas hospitalarias; aproximadamente son 84 camas por hospital.

Además, MINSA (2016) plantea el uso de “Puestos Médicos de Avanzada” (PMA), los cuales atenderán las necesidades de las víctimas heridas levemente y enviarán las víctimas graves a los hospitales de campaña o clínicas asociadas.

Las coordenadas de la mayoría de PMAs se obtuvo del “Listado de Instituciones Prestadoras de Salud” según MINSA (2017). En los casos de los centros de salud que no estaban en esa lista, se buscó en Google Maps; sin embargo, no se pudo encontrar información acerca del centro de salud Villa María del Triunfo; por lo que no será tomado en cuenta en esta tesis. En la tabla 6 se muestran los PMAs que no están presentes en el “Listado de Instituciones Prestadoras de Salud” junto con las áreas a las que pertenecen y coordenadas.

Tabla 6

PMAs no encontrados en la lista del MINSA (2017)

Área funcional	Puesto médico de avanzada	Norte	Este
1	CS Santa Rosa	-77.08384	-11.8745632
5a	CS Bellavista Perú Corea	-77.1087365	-12.0617569
6a	CS Santa Anita	-76.9836209	-12.0443876

Con el fin de apreciar la distribución de PMAs y hospitales de campaña de Lima Metropolitana y Callao, se muestra un mapa con dichos puntos (vea figura 9). Asimismo, se observa la saturación de hospitales de campaña en los sectores 4, 5a, 5b, 5c y 6a; sin embargo, no se observa esta acumulación de nosocomios en el sector 3, el cual es el sector con mayor población que requerirá de hospitalización. Por otro lado, el sector 4; el segundo con mayor población con necesidades de cuidados hospitalarios sí se encuentra en esta acumulación. En la figura 10 se muestran las frecuencias de la población con necesidades de hospitalización por cada sector y el mapa de PMAs y hospitales de campaña en Lima Metropolitana y Callao.

2.1.2 Población damnificada

La cantidad de población damnificada está relacionada con la vulnerabilidad, la exposición y la resiliencia de la misma; las cuales se analizaron en las secciones 1.2 y 1.3. Asimismo, PREDES (2009) realizó una simulación sobre el escenario propuesto, en la cual sectorizaron 41 distritos de Lima

Metropolitana y Callao y estimaron la cantidad de población afectada por cada sector tomando en cuenta los factores ya mencionados. En esta tesis solo se toma en cuenta los distritos mencionados por el estudio de PREDES (2009) porque no se encuentran estimaciones de heridos para los otros siete distritos. Además, MINSA (2016) separa a Lima Metropolitana y Callao en áreas funcionales, esto se puede notar en la figura 9, y propone la asignación de PMAs y hospitales de campaña por cada área.

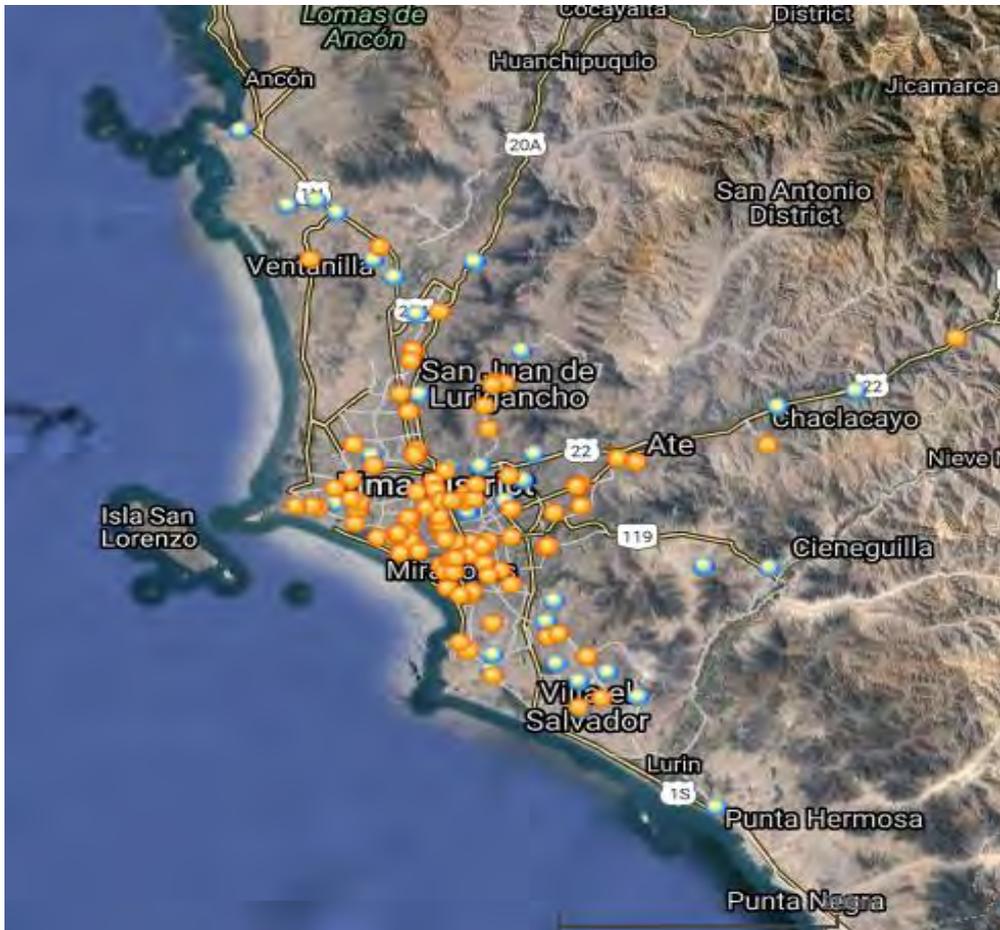


Figura 8. Mapa de PMAs y hospitales de campaña en Lima Metropolitana y Callao
Nota. Los puntos celestes corresponden a los PMA y los anaranjados a los hospitales de campaña.

Con respecto a los PMA, a continuación, se describe el procedimiento para hallar los heridos en cada uno de ellos: primero se calcula el factor de repetición, el cual es la cantidad de veces que se repite un distrito en un área funcional con el propósito de evitar sumar más de una vez la población. Luego, se multiplica la población total por el porcentaje de heridos y se divide el factor de repetición, para después sumar los distritos correspondientes a las áreas funcionales.

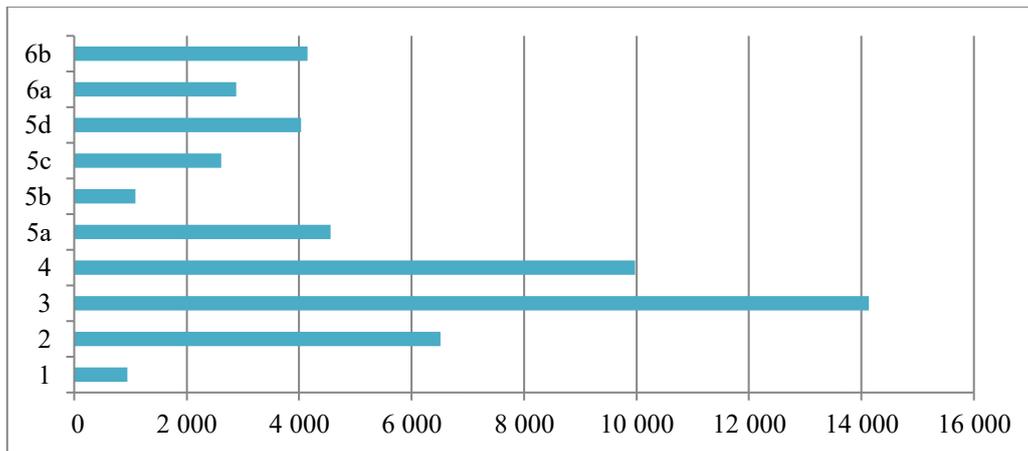


Figura 9. Cantidad de heridos con necesidades de hospitalización.

Elaborado con base en PREDES (2009).

Por ejemplo, si en las áreas “x” e “y” se repite el distrito “m”, el factor de repetición de “m” será “2”, por lo tanto, se tendrá que la población de heridos en el área “x” que pertenecen al distrito “m” es la población total por el porcentaje de heridos entre 2. Así, se estaría asignando la mitad de heridos para el área “x” y la otra mitad para el área “y”.

$$\text{Heridos por área} = \sum \frac{\text{Población total} \times \text{Porcentaje de heridos}}{\text{Factor de repetición}}$$

Finalmente, se reparte equitativamente los heridos por área en cada PMA, cabe resaltar que en el caso de que el mismo PMA sea utilizado para dos áreas, como es el caso del “CS El Porvenir” o “CLAS Juan Pablo II”, los heridos que podrá atender en total son la suma de los heridos que serían asignados por cada área hacia el PMA, por lo que tendría mayor cantidad de heridos por trasladar.

En la tabla 7 se muestran los porcentajes de personas afectadas por el siniestro en cada distrito.

Tabla 7

Porcentajes de afectados por distrito

Distrito	Porcentaje de fallecidos	Porcentaje de heridos	Porcentaje de no afectados
Ancón	0.10	1.00	98.90
Ate	0.36	4.15	95.49
Barranco	0.92	13.42	85.66
Bellavista	0.40	4.00	95.60
Carabayllo	1.30	19.00	79.70

Tabla 7 (continuación)

Porcentajes de afectados por distrito

Distrito	Porcentaje de fallecidos	Porcentaje de heridos	Porcentaje de no afectados
Carmen de La Legua Reynoso	0.10	0.20	99.70
Chaclacayo	0.10	1.00	98.90
Chorrillos	0.63	8.23	91.14
Cieneguilla	0.10	0.20	99.70
Comas	1.30	19.00	79.70
El Agustino	0.50	6.00	93.50
Independencia	0.19	1.71	98.10
Jesús María	0.20	1.80	98.00
La Molina	0.37	3.79	95.84
La Perla	0.40	4.00	95.60
La Punta	0.39	4.00	95.61
La Victoria	0.41	4.01	95.58
Lima	0.43	4.31	95.26
Lince	0.20	1.80	98.00
Los Olivos	0.20	1.97	97.83
Lurigancho	0.79	9.39	89.83
Magdalena	0.16	1.48	98.37
Miraflores	0.17	1.54	98.30
Pueblo Libre	0.20	1.80	98.00
Puente Piedra	1.30	19.00	79.70
Rímac	0.21	2.04	97.75
San Borja	0.20	1.80	98.00
San Isidro	0.20	1.80	98.00
San Juan de Lurigancho	0.94	13.83	85.22
San Juan de Miraflores	0.93	12.89	86.18
San Luis	0.10	1.00	98.90
San Martín de Porres	0.16	1.71	98.13
San Miguel	0.40	4.00	95.60
Santa Anita	0.10	1.00	98.90
Santiago de Surco	0.24	2.59	97.17
Surquillo	0.20	1.80	98.00
Ventanilla	0.40	4.00	95.60
Villa el Salvador	0.58	7.05	92.37
Villa María del Triunfo	0.87	12.53	86.60

Nota. Tomado de PREDES (2009).

Por otro lado, en el estudio de PREDES (2009) se obtiene el número de heridos; sin embargo, no es posible obtener la cantidad de heridos que necesitan hospitalización; por lo cual se utilizará el estudio de Bambarén, Uyen y Rodriguez (2017) quienes proponen un modelo probabilístico que estima la cantidad de damnificados que necesitarán atención médica ambulatoria, hospitalización, transfusiones de sangre, entre otros; para el caso de un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao. En ese estudio, los autores utilizan tasas obtenidas de terremotos ocurridos en Northridge, Wenchuan, California, Marmara y otros lugares citados en el trabajo mencionado; asimismo utilizan el punto medio entre el rango de porcentajes de personas heridas según Bambarén, Uyen y Rodriguez (2017) presentes en la figura 11 correspondientes a cuidado hospitalario (3.4% -26%) el cual es 14.7% y otro punto medio entre los pacientes que requieren hospitalización (20%-68%) el cual es 44%.

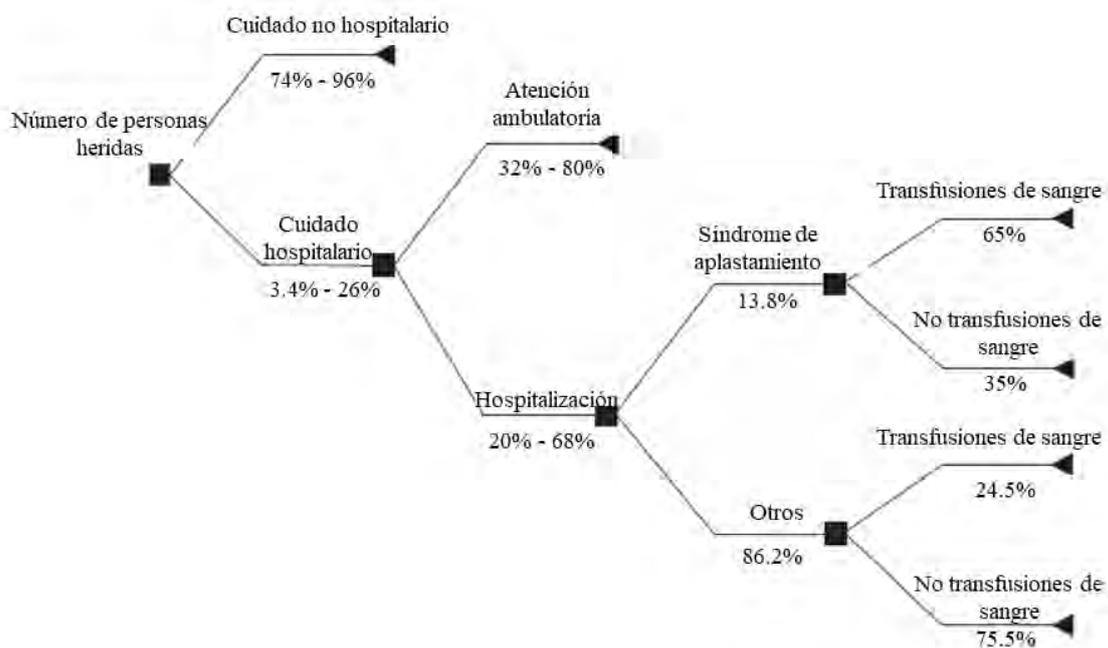


Figura 10. Porcentajes de frecuencias de necesidades hospitalarias
Adaptado de Bambarén, Uyen y Rodriguez (2017).

2.1.3 Justificación del modelo

Según MINSA (2016), la declaración de alerta que desencadena las acciones que se deben tomar para atender a los heridos, se debe activar dentro de las cuatro horas posteriores al sismo. Asimismo, el equipamiento y activación de los equipos médicos de emergencia, encargados de atender a los

afectados, ocurre en las siguientes 12 horas, por lo que la atención de víctimas dentro de las primeras 72 horas quedaría a cargo de los PMAs, en donde se concentrarían los pacientes. Cabe resaltar que el segundo pico de muerte ocurre dentro de las primeras cuatro horas (Gunst et al., 2010) y estos pacientes suelen utilizar camas de hospitalización (Bartels y VanRooyen, 2012), el cual es un recurso inexistente en PMAs, por lo que la movilización de pacientes hacia hospitales de campaña y clínicas se convierte en una prioridad para asegurar la vida y la salud de la población afectada.

2.2 Consideraciones para la aplicación del modelo

2.2.1 Tiempo de hospitalización

Según Bambarén, Uyen y Rodríguez (2017) las causas comunes de hospitalización en víctimas de terremotos son el síndrome de aplastamiento; fracturas múltiples que necesiten procedimiento quirúrgico para la extracción de cuerpos extraños de la herida, y otros procedimientos quirúrgicos y procedimientos que necesiten transfusiones de sangre. Debido a esto, el tiempo de uso de la cama por parte de estos pacientes excede a más de un día; así, por ejemplo, Chen et al. (2011) afirma es posible que los pacientes con síndrome de aplastamiento permanezcan por más de dos meses internados. Esto sucede debido a infecciones de heridas e infección aguda renal, la cual reduce el funcionamiento de los riñones rápidamente, por lo que la hemodiálisis es necesaria. Por ello, no sería posible atender a las víctimas que no alcanzan a utilizar una cama en los primeros días del suceso.

2.2.2 Tiempos límites de atención a los heridos de gravedad

Uno de los criterios más importantes para atender a los pacientes es el tiempo límite de atención, ya que con este dato se podrá establecer la ventana de tiempo. Gunst et al. (2010) clasifican las muertes de los heridos en inmediatas, tempranas y tardías; tomando en cuenta que las muertes evitables son las tempranas hasta cuatro horas desde el evento y las tardías hasta cinco semanas. Se toma en cuenta el intervalo menor de tiempo como tiempo límite para la atención a los heridos, ya que probablemente, este represente a las víctimas con clasificación roja y amarilla en el triaje. Como se indicó en el capítulo 2, esta tesis se enfoca en el transporte de víctimas con triaje rojo o amarillo hacia los hospitales de campaña o EMT.

2.2.3 Capacidad de ambulancias y trayectorias

Debido a que los pacientes llevados por las ambulancias se encuentran gravemente heridos, estos deberán ser transportados en camillas, además, esta ambulancia debe transportar a los paramédicos que asegurarán la salud del paciente hasta llegar al hospital correspondiente; de este modo, la capacidad de las ambulancias se tomará como una por cada paciente. Las trayectorias se obtuvieron de Bing Maps API y se consideró una velocidad media de 50 km/h para las ambulancias.

2.2.4 Supuestos del modelo

A continuación se detallan las suposiciones para la formulación del modelo de programación entera mixta.

Se trabaja con 102 hospitales y 36 PMAs en Lima Metropolitana y Callao cuyas coordenadas se encuentran en los anexos 3 y 4, se asume que todos poseen todas las camas disponibles justo antes del sismo, que no sufrirán ningún derrumbe y la cadena de suministro de medicinas no será afectada; en caso contrario, esta será repuesta rápidamente, al igual que los servicios de agua y luz, de otra manera las víctimas podrían fallecer y llevarlas al hospital no aseguraría su supervivencia.

Se asume que ninguno de los heridos se aproxima al hospital con sus propios medios, todos ellos se aproximan al PMA más cercano y son derivados a los hospitales correspondientes. Asimismo, se asume que las avenidas principales se encuentran transitables.

En cuanto a las ambulancias, se asume que estos vehículos cuentan con los implementos necesarios para asegurar la vida del paciente hasta el hospital correspondiente, además, todas son similares en cuanto a capacidad. Se supone que las ambulancias comienzan con el tanque de combustible lleno y cuentan con suficiente combustible para todo el viaje.

2.3 Propuesta de modelo

En esta tesis se propone un modelo de programación entera mixta basado en Talarico, Meisel y Sörensen (2014) y en el modelo Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) reseñado en Toth y Vigo (2012), este último busca minimizar el costo de transporte de una flota de vehículos que reparte un bien a sus clientes en una ventana de tiempo $[a, b]$, por lo que se restringe el tiempo de llegada y el tiempo de atención al cliente en esta ventana, así como la capacidad de carga del vehículo.

Conjuntos

H : set de hospitales

P : set de pacientes

K : set de ambulancias

N : set de PMAs

Parámetros

M : número entero muy grande

C_h : capacidad de hospital i medido en número de camas

d_{ij} : distancia del nodo i al nodo j

s_i : tiempo de servicio de despacho del paciente i a la ambulancia

s_h : tiempo de despacho de la ambulancia al hospital h

a_i : tiempo de arribo temprano de la ambulancia al paciente i

b_i : tiempo de arribo tardío de la ambulancia al paciente i

p_i : PMA al que pertenece el paciente i

V_{med} : velocidad media de una ambulancia

Variables:

x_{ij}^k : decisión de utilizar el arco del nodo i al nodo j con la ambulancia k

f_h^k : decisión de iniciar en el hospital h con la ambulancia k

w_i^k : tiempo de visita al paciente i con la ambulancia k

u_i^h : decisión de atención al paciente i en el hospital h

Función objetivo

$$(1) \quad \max \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} u_i^h$$

Esta función maximiza la cantidad de pacientes que se internarán en las camas de hospitalización.

Restricciones

$$(2) \quad \sum_{j \in P \cup H} x_{hj}^k = f_h^k \quad \forall h \in H, \forall k \in K$$

La restricción (2) indica que la ambulancia k debe utilizar algún arco que inicie en el hospital donde parte y termine en algún hospital o paciente (vea figura 12).

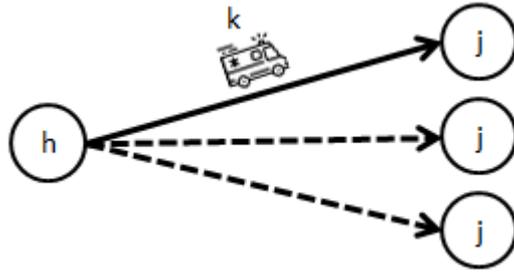


Figura 11. Uso de solo un camino de la ambulancia k desde un hospital h hasta algún paciente j

$$(3) \quad \sum_{j \in PUH} x_{jh}^k = f_h^k \quad \forall h \in H, \forall k \in K$$

La restricción (3) exige a la ambulancia a regresar al hospital de donde partió, de esta manera se evitará dejar ambulancias en los caminos, las cuales podrían obstaculizar el tránsito a otros vehículos que también brinden ayuda humanitaria. Para este fin, la ambulancia k debe utilizar algún arco que tenga como nodo final el hospital h donde inició el servicio y esta decisión debe ser igual a la variable que indica el inicio de la ambulancia k en dicho hospital h . La figura 13 muestra un gráfico que explica esta restricción.

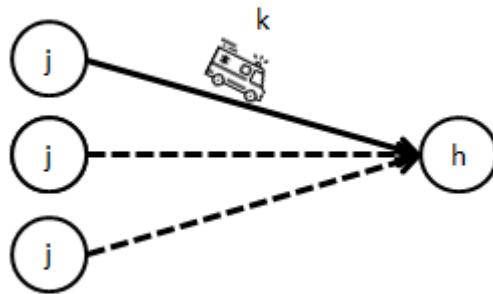


Figura 12. La ambulancia debe utilizar algún camino que regrese a su hospital de origen

$$(4) \quad \sum_{k \in K} \sum_{j \in PUH} x_{ji}^k = 1 \quad \forall i \in P$$

La restricción (4) asegura que un paciente i es atendido por solo una ambulancia k , la cual puede recorrer cualquier nodo j que pertenezca a los hospitales u otros pacientes. Con esta restricción se desea

evitar que dos o más ambulancias transporten al mismo paciente. La figura 14 describe gráficamente la restricción.

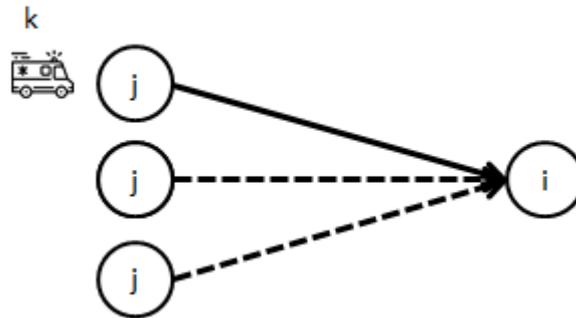


Figura 13. Un paciente es atendido por solo una ambulancia

$$(5) \quad \sum_{j \in P \cup H} x_{ji}^k = \sum_{j \in P \cup H} x_{ij}^k \quad \forall i \in P, k \in K$$

La restricción (5) asegura que exista un flujo continuo entre los nodos y que ninguna ambulancia se quede varada en algún PMA. Para lograr este objetivo, si la ambulancia k utiliza el arco ji , también debe utilizar cualquier arco que salda de i , el cual tendría la forma ij . La figura 15 ilustra cómo opera la restricción.

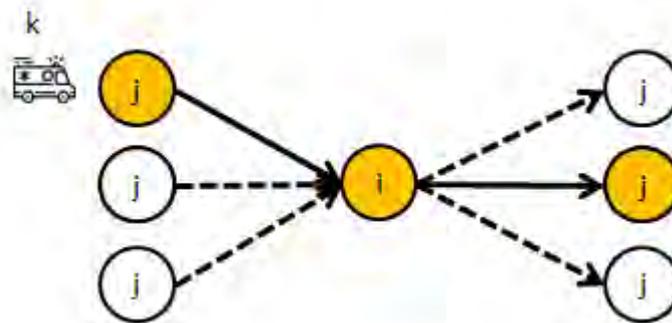


Figura 14. Todas las ambulancias salen del nodo al que ingresan

$$(6) \quad \sum_{i \in P} u_i^h \leq C_h \quad \forall h \in H$$

La restricción (6) asegura la cantidad de heridos que se interna no exceda la capacidad del hospital.

$$(7) \quad w_i^k + s_i + d_{ih} \div Vmed + s_h + d_{hj} \div Vmed \leq w_j^k + \left(2 - \sum_{k \in K} x_{hj}^k - u_i^h \right) \times M$$

$$\forall i \in P, \forall j \in P, \forall h \in H, \forall k \in K$$

En la parte derecha de la restricción (7), se suma el tiempo de visita al paciente en el PMA i ; el tiempo de despacho del paciente i a la ambulancia; el tiempo de traslado desde el PMA donde se encuentra el paciente i al hospital ($d_{ih} \div Vmed$); el tiempo de despacho de la ambulancia al hospital y el tiempo de traslado desde el hospital al paciente j . La parte derecha debe ser menor o igual al tiempo de llegada al paciente en el PMA.

Esta restricción (7) obliga a que el tiempo de llegada de la ambulancia k al paciente j sea mayor al del paciente i , si el paciente j es atendido justo después del paciente i por la misma ambulancia k . De esta manera, se prohíbe que la ambulancia k atienda al paciente j cuando está en el hospital h dejando al paciente i o antes. La figura 16 ilustra la restricción (7).

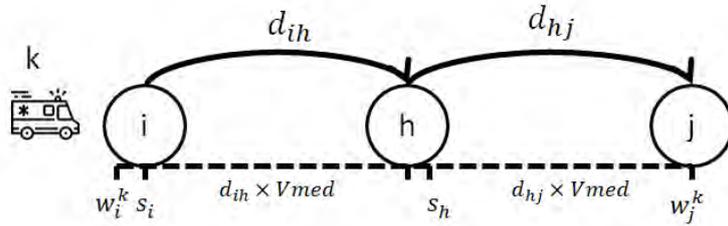


Figura 15. El tiempo de llegada al paciente j debe ser mayor que el tiempo en el que parte del hospital anterior

$$(8) \quad a_i \times \sum_{i \in P \cup H} x_{ij}^k \leq w_i^k \leq b_i \times \sum_{i \in P \cup H} x_{ij}^k$$

Esta restricción (8) solo permite la atención del paciente i entre la ventana de tiempo $[a_i, b_i]$, esto sucede en caso el vehículo k atienda al paciente i . La figura 17 ilustra la restricción.

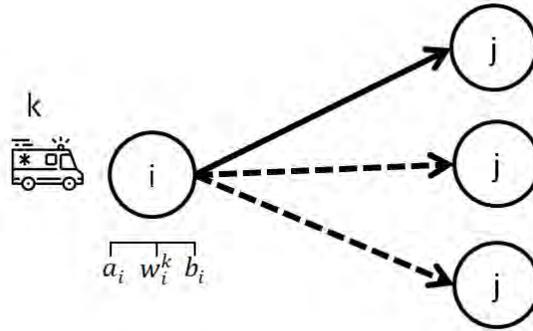


Figura 16. El tiempo de visita al paciente debe estar entre la ventana de tiempo

$$(9) \quad x_{ij}^k \in \{0,1\}$$

$$(10) \quad f_h^k \in \{0,1\}$$

$$(11) \quad u_i^h \in \{0,1\}$$

$$(12) \quad w_i^k \geq 0$$

Las restricciones (9), (10), (11) y (12) son las del rango de existencia.

Con este modelo que tome en cuenta las ventanas de tiempo para la supervivencia del paciente, el cual es un factor que Talarico, Meisen y Sørensen (2014) no toman en cuenta en su estudio. Asimismo, este factor, podrá ayudar a tomar las medidas necesarias en la etapa de preparación para poder atender a la mayor cantidad de heridos.

2.3.1 Programación del modelo usando PULp en Python

Se utiliza los datos mencionados anteriormente para formular el modelo en el lenguaje Python; para este fin, se utilizaron los siguientes sets:

- “HOSPITALES”: lista de hospitales de campaña.
- “PMAS”: lista de PMAs.
- “AMBULANCIAS”: lista de las ambulancias.

La lista “arcos” utilizada para definir la variable x_{ij}^k contiene todos los arcos posibles desde todos los nodos entre sí, evitando el arco entre los mismos nodos, tomando en cuenta las ambulancias. Asimismo, el diccionario “distancias” contiene la información de las distancias entre todos los nodos.

En las figuras 18 a 21 se muestra las partes del modelo de programación entera mixta programadas en Python utilizando el paquete PULp.

```

1 # variables de decisión
2
3 # arcos
4 x=LpVariable.dicts('x', arcos,0,1,LpBinary)
5
6 # inicio de ambulancia
7 f=LpVariable.dicts('f',[(k,h) for k in AMBULANCIAS for h in HOSPITALES],0,1,LpBinary)
8
9 # tiempo de visita al paciente
10 w=LpVariable.dicts('w',[(k,i) for k in AMBULANCIAS for i in heridos],0,None,LpContinuous)
11
12 # decision si el paciente i fue atendido por el hospital h_5
13 u=LpVariable.dicts('u',[(h,i) for h in HOSPITALES for i in heridos],0,1,LpContinuous)

```

Figura 17. Variables de decisión en Python

```

1 #parametros:
2 si={key:0 for key in heridos}           # tiempo de servicio del paciente
3 sh={key:0 for key in HOSPITALES}       # tiempo de despacho del paciente al hospital
4 ai={key:0.5 for key in heridos}       # tiempo de arribo temprano para los heridos
5 bi={key:4*60 for key in heridos}     # tiempo de arribo tardio para los heridos
6 M=10000000 # número muy grande

[ ] 1 # p indica si paciente i se encuentra en el PMA correspondiente
2 p={str(herido): '' for herido in heridos}
3
4 pma_heridos={pma:cant for (pma,cant) in zip(df_pma['nom_pulp'],lista_heridos)}
5
6 # asignamos los valores
7 for item in range(len(PMA)):
8     for herido in heridos:
9         if item!=0:
10            if (herido<=pma_heridos[PMA[item]]) and (herido>=pma_heridos[PMA[item-1]]):
11                p[str(herido)]=PMA[item]
12            else:
13                if (herido<=pma_heridos[PMA[item]]):
14                    p[str(herido)]=PMA[item]
15

```

Figura 18. Parámetros en Python

```

[] 1 from pulp import *

[] 1 #crear el problema
2 prob=LpProblem('ambulance_routing',LpMaximize)

1 # funcion objetivo
2 f_o=lpSum(lpSum(u[j,i] for j in HOSPITALES) for i in heridos)
3 prob+=f_o
4
5 # restricciones
6 for h in HOSPITALES:
7     for k in AMBULANCIAS:
8
9         # quitar el hospital desde el q se itera
10        lista_lugares=HOSPITALES+PMA
11        lista_lugares.remove(h)
12
13        prob+=lpSum(x[k , h , j] for j in lista_lugares )==f[k , h]

```

Figura 19. Modelo programado en Python utilizando PULp

```

14
15 for h in HOSPITALES:
16     for k in AMBULANCIAS:
17
18         # quitar el hospital desde el q se itera
19         lista_lugares=HOSPITALES+PMA
20         lista_lugares.remove(h)
21
22         prob+=lpSum(x[k , j , h] for j in lista_lugares )==f[k , h]
23
24 for i in heridos:
25     lista_lugares=HOSPITALES+PMA
26     lista_lugares.remove(p[str(i)])
27     prob+=lpSum(lpSum(x[k , j , p[str(i)]] for j in lista_lugares) for k in AMBULANCIAS)>=1
28
29 for i in heridos:
30     for k in AMBULANCIAS:
31         lista_lugares=HOSPITALES+PMA
32         lista_lugares.remove(p[str(i)])
33         prob+=lpSum(x[k , j , p[str(i)]] for j in lista_lugares )==lpSum(x[k , p[str(i)] , j] for j in lista_lugares)

```

```

34
35 for h in HOSPITALES:
36     prob+=lpSum(u[h , i] for i in heridos)<=Ch[h]
37
38 for h in HOSPITALES:
39     for i in heridos:
40         for j in heridos:
41             if i!=j :
42                 prob += w[k , i] + si[i] + distancias[p[str(i)]] [h] * 60/50 + sh[h] + distancias[h][p[str(j)]]*60/50 <= w[k
43
44
45 for k in AMBULANCIAS:
46     for i in heridos:
47         prob += ai[i]*lpSum(u[h , i] for h in HOSPITALES)<= w[k , i] <= bi[i]*lpSum(u[h , i] for h in HOSPITALES)
48

```

Figura 20. Modelo programado en Python utilizando PULp (continuación)

2.3.2 Limitaciones del equipo de cómputo

Debido a la cantidad de variables (59 133 272 variables) no es posible correr este modelo en el equipo utilizado, el cual es una instancia de Google Colab con 12 Gb de RAM y 2vCPU de 2.2GHz. Esto se debe a que el modelo implementado es una variante de VRPTW y según Toth y Vigo (2002) pertenece a la categoría NP difícil. Una característica notable de estos problemas es la gran complejidad computacional que poseen, esto se evidencia en el aumento casi exponencial en el tiempo de ejecución

cuando aumenta la cantidad de nodos lo cual determina que la solución se obtenga un tiempo inmenso. Esa dificultad no permitiría obtener una solución en un tiempo apropiado, lo cual es importante para los fines de esta tesis en donde se requiere un tiempo de respuesta oportuno para atender a los damnificados.

Por otro lado, en el modelo se incluye 102 hospitales; 36 PMA (detalles en los anexos 1 y 2, respectivamente) y 10 ambulancias por cada hospital, lo que equivale a 138 nodos y 3 745 440 arcos, con 50 892 heridos en total, lo cual incide también en el tiempo de solución del modelo.

Con respecto al número de heridos, se calculó tomando en cuenta el porcentaje de heridos en el estudio de PREDES (2009) y el porcentaje de heridos que se obtuvo del estudio de Bambarén, Uyen y Rodríguez (2017).

Con los parámetros expuestos anteriormente, sería imposible resolver el modelo de programación lineal entera, no solo por el tiempo de ejecución, sino por la capacidad necesaria de almacenamiento y procesamiento; los cuales son recursos limitados en este estudio. Debido a este inconveniente se planteará una heurística para la obtención de rutas.

2.4 Planteamiento de la heurística

Para encontrar la solución al problema planteado anteriormente, se adaptará la heurística propuesta por Talarico, Meisen y Sörensen (2014). A continuación, se presentarán las tres etapas de la heurística.

- Inicial: en esta parte se construye una solución inicial utilizando una de las dos heurísticas aleatorias planteadas (inserción y constructiva).
- Intensificación: en esta parte de la heurística se busca mejorar la solución actual utilizando la heurística “Variable Neighbourhood Descend” (VND).
- Diversificación: la solución actual es destruida con alguno de los operadores Rem_2 , Rem_{rand} y Rem_{all} (más adelante se explica qué función cumplen esos operadores) y es reparada nuevamente con el operador *Repair*, esta reconstrucción se realiza con el fin de añadir exploración a la búsqueda y contar con una solución que se aproxime a la óptima.

Por otro lado, Talarico, Meisen y Sörensen (2014) refieren que la metaheurística “Large Neighbourhood Search” (LNS) empieza el proceso inicializando α como un número 0 o 1. Definido α , empieza la etapa inicial llamando a la heurística de inserción ($\alpha = 0$) o a la constructiva ($\alpha = 1$), una vez que se obtiene la solución inicial se aplica VND para que busque la mejor solución entre las rutas de la solución inicial; después se añade una visita de un PMA hacia un hospital en cada ruta de las ambulancias. Si ya se cuenta con una solución inicial, se escoge entre los operadores Rem_2 , Rem_{rand} , Rem_{all} , los cuales remueven de la ruta de la ambulancia con mayor tiempo, los dos últimos pacientes (Rem_2), un paciente aleatoriamente (Rem_{rand}) o toda la ruta (Rem_{all}), en ese orden. Luego se reconstruye la solución y se

aplica VND para buscar el orden óptimo y se añade un paciente más con su respectiva visita. Se itera este proceso hasta que el tiempo de las ambulancias sea igual que el límite de la ventana temporal. Después de obtener esta solución s , se compara con la solución del proceso anterior s^* y se guarda la solución con mayor valor en la función objetivo $f(s)$.

En la figura 22 se muestra el pseudocódigo de la heurística LNS adaptada para el problema actual, la cual desencadena la heurística de inserción, la heurística constructiva y la búsqueda local de VND para generar la solución.

Algorithm 1 LNS Metaheurística

```

1: Inicializar los parámetros de la metaheurística  $I$  y  $L$ ;
2: Sea  $s^*$  la mejor solución hasta el momento y  $f(s^*)$  el valor de su función objetivo;
3: Sea  $s$  la solución actual y  $f(s)$  el valor de su función objetivo;
4:  $s^*, s \leftarrow \emptyset, f(s^*), f(s) \leftarrow 0$ ;
5: Sea  $i$  el contador de iteraciones;
6: Sea  $l$  el contador de iteraciones sin mejoras;
7:  $i \leftarrow 0, l \leftarrow 0$ ;
8: while ( $i < I$ ) do
9:   if ( $i = 0 \vee l = L$ ) then
10:     $\text{random} \leftarrow \text{RandInt}([0, 1])$ ;
11:     $\alpha \leftarrow \text{RandInt}([2, 5])$ ;
12:    switch (( $\text{random}$ ))
13:      case ( $\text{random} = 0$ ):
14:         $s \leftarrow \text{InsertionHeuristic}(\alpha)$ ;
15:      case ( $\text{random} = 1$ ):
16:         $s \leftarrow \text{ConstructiveHeuristic}(\alpha)$ ;
17:      end switch
18:     $l \leftarrow 0$ ;
19:  else
20:     $\text{random} \leftarrow \text{RandInt}([0, 2])$ ;
21:    switch (( $\text{random}$ ))
22:      case ( $\text{random} = 0$ ):
23:         $s \leftarrow \text{Rem}_2(s)$ ;
24:      case ( $\text{random} = 1$ ):
25:         $s \leftarrow \text{Rem}_{\text{rand}}(s)$ ;
26:      case ( $\text{random} = 2$ ):
27:         $s \leftarrow \text{Rem}_{\text{all}}(s)$ ;
28:      end switch
29:     $s \leftarrow \text{ConstructiveHeuristic}(\alpha = 1, s)$ ;
30:  end if
31:   $s \leftarrow \text{VND}(s)$ 
32:   $s \leftarrow \text{ConstructiveHeuristic}(\alpha = 1, s)$ ;
33:  if ( $f(s) > f(s^*)$ ) then
34:     $s^* \leftarrow s$ ;
35:     $l \leftarrow 0$ ;
36:  else
37:     $l ++$ ;
38:  end if
39:   $i ++$ ;
40: end while
41: return  $s^*$ 

```

Figura 21. Metaheurística LNS

En la figura 23 se muestra el pseudocódigo de la heurística de inserción que corresponde a la etapa inicial.

Algorithm 2 Heurística de inserción

```
1: Sea  $pac_N$  una lista con los pacientes no atendidos
2: Sea  $amb_N$  una lista de ambulancias no utilizadas hasta el momento
3: Sea  $a$  una ambulancia seleccionada aleatoriamente y  $h$  el hospital donde se
   encuentra;
4: sea  $r$  la ruta de  $a$ ;
5:  $r \leftarrow [h]$ ;
6: Sea  $Ch_{sum}$  la suma de capacidades de todos los hospitales;
7: Sea  $B$  el límite de tiempo mayor de todos los pacientes;
8: Sea  $t$  el tiempo final de la ruta de la ambulancia  $a$ ;
9: asignar la ruta  $r$  a la ambulancia  $a$ ;
10:  $t \leftarrow 0$ ;
11: while ( $Ch_{sum} > 0 \wedge t < B \wedge (length(pac_N) > 0) \wedge (length(amb_N) > 0)$ ) do
12:   Sea  $j$  un paciente no atendido seleccionado aleatoriamente;
13:   Sea  $C$  una lista de candidatos con las  $\alpha$  posiciones menos costosas para
   insertar  $j$  en la ruta actual;
14:   Seleccionar una posición de inserción  $i \in C$ ;
15:   Separar la lista justo antes de la posición  $i$ ;
16:   Agregar  $j$  en la posición  $i$  y agregar el hospital más cercano  $\hat{h}$  con capaci-
   dad libre a la ruta en la posición  $i + 1$ ;
17:   Actualizar  $t$ ;
18:   Actualizar la capacidad del hospital  $h$ ;
19:   Actualizar  $pac_N$ ;
20:   if  $t > B$  then
21:     cerrar la ruta  $r$ ;
22:     quitar la ambulancia  $a$  de la lista  $amb_N$ ;
23:     Seleccionar la ambulancia con menor tiempo final;  $\hat{a}$ 
24:     Sea  $\hat{t}$  el tiempo final de la ambulancia  $\hat{a}$ 
25:      $a \leftarrow \hat{a}$ ;
26:      $t \leftarrow \hat{t}$ ;
27:   end if
28: end while
29: return  $s$ 
```

Figura 22. Heurística de inserción

En la heurística de inserción, se busca insertar a los pacientes en la ruta, de forma no ordenada, con el fin de construir rutas factibles. Cabe resaltar que en comparación con la heurística de Talarico, Meisel y Sörensen (2014) en donde existen pacientes que se pueden atender en la ambulancia sin necesidad de llevarlos a un hospital y la condición para continuar iterando en la misma ambulancia es que se hayan visitado todos los pacientes; en esta tesis, no existen pacientes que se puedan atender ambulatoriamente y la condición para continuar iterando en la misma ambulancia es que el tiempo final sea mayor al límite de tiempo o todos los hospitales no cuenten con capacidad libre para recibir pacientes que necesitan ser internados. En la figura 24 se muestra el pseudocódigo de la otra parte inicial de la heurística, que corresponde a la heurística constructiva.

En la heurística constructiva, en comparación con la heurística de inserción, se cambia de ambulancia cada vez que se agrega un paciente a la ruta de la ambulancia anterior. Esto asegura dos aspectos: que los pacientes estén distribuidos en las rutas de las ambulancias y que los métodos sean diferentes entre sí y aleatorios al mismo tiempo. Finalmente, en la figura 25 se muestra la heurística de VND, esta busca encontrar la mejor solución implementando diferentes operadores para mover las soluciones hacia espacios o vecindades no exploradas con el fin de escapar de óptimos locales. En la figura 25 se muestra el pseudocódigo de la heurística VND y a continuación se explica los operadores de las vecindades.

Algorithm 3 Heurística constructiva

```

1: Sea  $Ch_{sum}$  la suma de capacidades de todos los hospitales;
2: Sea  $B$  el límite de tiempo mayor de todos los pacientes;
3: Sea  $T$  los tiempos finales de las ambulancias
4: Sea  $pac_N$  una lista con los pacientes no atendidos
5: while ( $Ch_{sum} > 0 \wedge T < B \wedge (length(pac_N) > 0)$ ) do
6:   Sea  $a$  la ambulancia que esté disponible antes en la solución;
7:   Sea  $t$  el tiempo final de  $a$ ;
8:   Sea  $h$  el hospital en donde la ambulancia  $a$  está localizada;
9:   Sea  $C^P$  la lista candidata de  $a$  de pacientes no atendidos más cercanos a
    $a$ ;
10:  Sea  $i$  un paciente elegido aleatoriamente de  $C^P$ 
11:  Sea  $C^h$  la lista candidata de  $a$  de hospitales con capacidad libre más
   cercanos a  $a$ ;
12:  Sea  $h$  un hospital elegido aleatoriamente de  $C^h$ ;
13:  agregar  $i$  a la ruta de  $a$ ;
14:  agregar  $h$  a la ruta de  $a$ ;
15:  Actualizar  $t$ ;
16:  Actualizar la capacidad del hospital  $h$ ;
17:  quitar el paciente  $i$  de la lista  $pac_N$ ;
18:  Sea  $\hat{a}$  la nueva ambulancia con menor tiempo final;
19:   $a \leftarrow \hat{a}$ 
20: end while
21: return  $s$ 

```

Figura 23. Heurística constructiva

Algorithm 4 VND Heuristic

```

1: Sea  $s$  la solución actual y  $sumtiempo(s)$  el valor de la suma de tiempos
   finales de todas las ambulancias en  $s$ ;
2: Sea  $s^*$  la mejor solución encontrada hasta el momento y  $sumtiempo(s^*)$  el
   valor de la suma de tiempos finales de todas las ambulancia en  $s^*$ ;
3:  $\lambda \leftarrow 1$ ;
4: for ( $\lambda \leq 5$ ) do
5:    $s \leftarrow N_\lambda(s)$ ;
6:   if ( $sumtiempo(s) > sumtiempo(s^*)$ ) then
7:      $s^* \leftarrow s$ ;
8:      $\lambda \leftarrow 1$ ;
9:   else
10:     $\lambda ++$ 
11:   end if
12: return  $s^*$ 

```

Figura 24. Heurística VND

Los operadores que se presentan a continuación fueron adaptados del estudio de Talarico, Meisen y Sörensen (2014) para adecuarlos al problema de esta tesis.

En la misma ruta

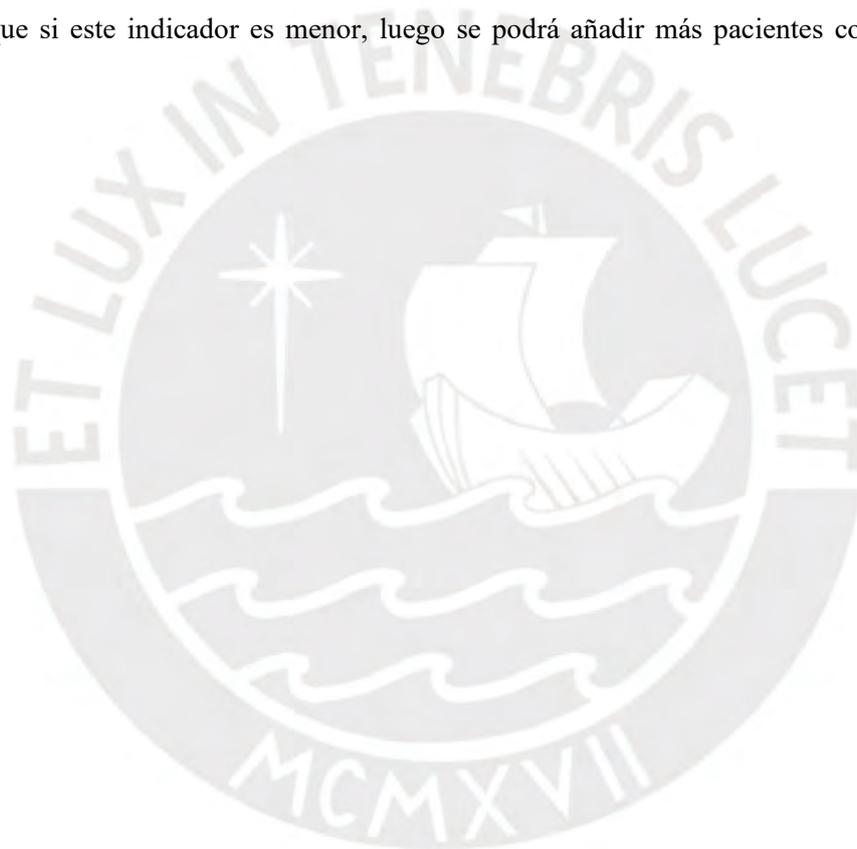
1. Reubicación de pacientes: un paciente que pertenece a la ruta elegida aleatoriamente es reubicado en otra parte de la ruta. Para esto se sustraerá el hospital en el que se internaría y se buscaría otro en la nueva ruta que cuente con capacidad libre.
2. Intercambio interno de pacientes: dos pacientes en distintas posiciones en una misma ruta se intercambian.

Entre rutas

1. Intercambio externo de pacientes: dos pacientes de diferentes rutas son intercambiados.
2. Intercambio de subrutas: se eligen dos pacientes de dos rutas distintas, luego se cortan las rutas, justo después de dejar al paciente en el hospital correspondiente, y se intercambian las subrutas entre ambas ambulancias.
3. Reasignamiento de rutas: la ruta de una ambulancia se asigna a otra ambulancia.

Cabe resaltar que los operadores se muestran en el pseudocódigo como N_λ , donde λ es el número de referencia del operador a efectuar.

Asimismo, la función que se optimiza es la suma de tiempos finales de todas las ambulancias en la solución, ya que si este indicador es menor, luego se podrá añadir más pacientes con la heurística constructiva.



CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados de la heurística propuesta en el capítulo previo. La función objetivo que se propone es maximizar la cantidad de heridos que se transportarían a los hospitales cumpliendo los límites de tiempo de cada herido, es decir, antes de las cuatro horas de ocurrido el desastre. Debido a que la heurística demoraba más de un día en ejecutar todas las áreas, se decidió agrupar algunas áreas en clústeres los cuales se muestran en la tabla 8.

Tabla 8

Áreas funcionales agrupadas en clústeres

Clúster	Áreas funcionales
1	1 y 2
2	3
3	4
4	5a y 5b
5	5c y 5d
6	6a y 6b

Asimismo, debido a que no se tiene información acerca de la capacidad real de camas, se ejecuta la heurística para cada clúster tomando en cuenta 20%, 50% y 70% de capacidad de camas y se determina la cantidad de ambulancias empíricamente para cada una de estas corridas; para simplificar el modelo se tomó una cantidad igual de ambulancias para cada hospital localizado en cada clúster. En las tablas 9 y 10 se muestra el resumen de los resultados por cada clúster, teniendo en cuenta las capacidades anteriormente mencionadas.

Por otro lado, la cantidad de ambulancias para todos los casos cumple con la cantidad mínima necesaria para transportar a la mayor cantidad de pacientes a los hospitales cumpliendo la ventana de tiempo de cuatro horas; excepto en el clúster 3 escenario de 20%, 70%, tampoco para todos los escenarios del clúster 4 y del escenario con 20% de capacidad del clúster 5. Cabe resaltar que estas cifras se hallaron empíricamente corriendo la heurística múltiples veces con diferentes valores para este parámetro. Este suceso se puede observar en las gráficas de la evolución de la función objetivo en cada iteración, las cuales se muestran en las figuras 26 a 28.

Tabla 9

Resumen de las ambulancias de la solución para los clústeres 1, 2 y 3

Clúster	1			2			3		
	20%	50%	70%	20%	50%	70%	20%	50%	70%
Capacidad	2	6	8	22	44	55	10	15	30
Cantidad de ambulancias	2	6	8	22	44	55	10	15	30
Tiempo final promedio	3.563	3.927	3.891	3.875	3.931	3.928	2.903	3.911	3.397
Tiempo final máximo (horas)	3.971	3.989	3.995	3.974	4.158	3.972	3.090	4.130	3.592
Tiempo final mínimo (horas)	3.154	3.890	3.804	3.679	3.808	3.309	2.693	3.751	3.198

Tabla 10

Resumen de las ambulancias de la solución para los clústeres 4, 5 y 6

Clúster	4			5			6		
	20%	50%	70%	20%	50%	70%	20%	50%	70%
Capacidad	76	228	342	116	174	261	16	64	80
Cantidad de ambulancias	76	228	342	116	174	261	16	64	80
Tiempo final promedio (horas)	3.210	3.518	3.490	3.369	3.890	3.911	3.903	3.461	3.853
Tiempo final máximo (horas)	3.491	3.891	3.721	3.889	3.997	4.112	4.238	4.019	4.615
Tiempo final mínimo (horas)	3.050	2.922	3.278	3.031	3.237	3.814	3.788	3.160	3.759

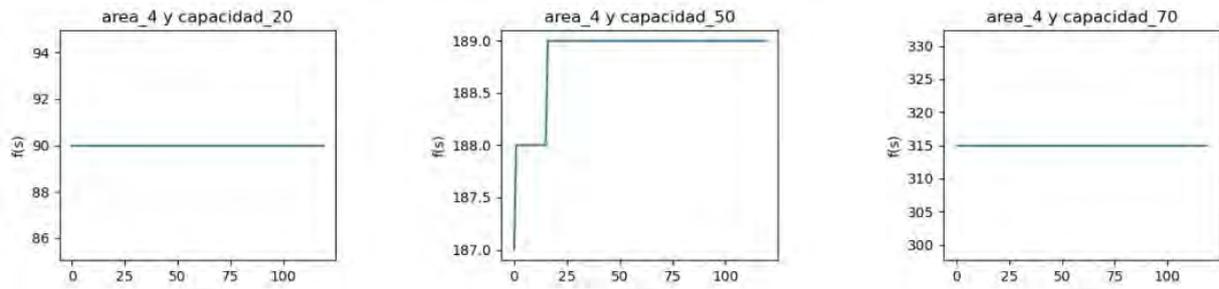


Figura 25. Evolución de la función objetivo en cada iteración del clúster 3

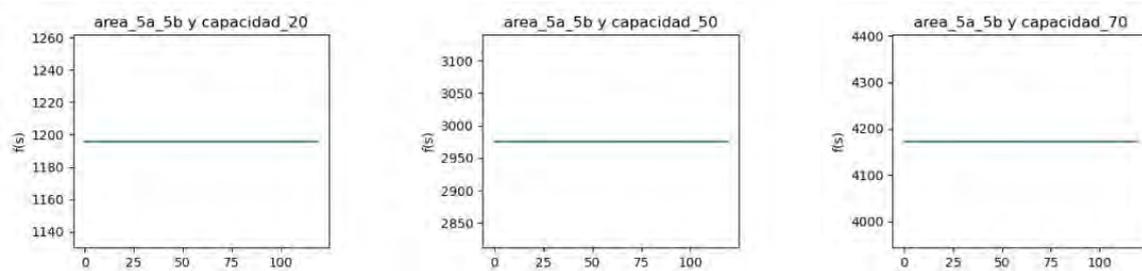


Figura 26. Evolución de la función objetivo en cada iteración del clúster 4

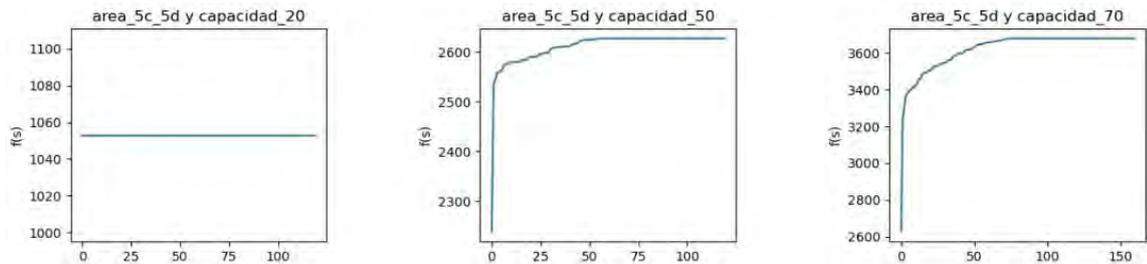


Figura 27 Evolución de la función objetivo en cada iteración del clúster 5

Como se puede observar en las figuras 26, 27 y 28, existen iteraciones en donde la función objetivo llegó a la capacidad máxima de los hospitales en cada escenario desde la primera iteración, esto se debe a que existe un exceso de ambulancias para cada escenario con este comportamiento. Es posible encontrar una mejor solución si se varían las cantidades de ambulancias por cada hospital en cada caso. Sin embargo, ese procedimiento tomaría mucho tiempo y este recurso es escaso en los entornos en los que opera la logística humanitaria. Además, la solución obtenida satisfaría el objetivo principal que es llevar la mayor cantidad de víctimas posibles al centro médico más cercano respetando los límites de tiempo de visita, por lo que la solución obtenida logra el objetivo de contribuir a la solución del problema propuesto en esta tesis.

Si bien en algunas ambulancias los tiempos finales son mayores a cuatro horas, todos los tiempos de visita hacia los pacientes son menores al límite de cuatro horas, es decir, son atendidos dentro de la ventana de tiempo; por lo que se espera que menos pacientes fallezcan antes de ingresar en la ambulancia. En las tablas 11 y 12 se muestra un recuento de los pacientes atendidos por las ambulancias en toda la solución.

Tabla 11

Resumen de los pacientes atendidos de la solución para los clústeres 1,2 y 3

Clúster	1			2			3		
	20%	50%	70%	20%	50%	70%	20%	50%	70%
Capacidad	20%	50%	70%	20%	50%	70%	20%	50%	70%
Tiempo promedio de visita (horas)	1.672	2.023	1.916	1.919	2.002	1.936	1.376	1.956	1.502
Tiempo máximo de visita (horas)	3.819	3.925	3.861	3.871	3.944	3.936	2.875	3.915	3.377
Cantidad pacientes atendidos	39	100	139	297	739	1036	90	189	315
Cantidad pacientes no atendidos	4 165	4 104	4 065	17 092	16 650	16 353	9 881	9 782	9 656
Total de pacientes	4 204	4 204	4 204	17 389	17 389	17 389	9 971	9 971	9 971

Se puede notar que el promedio del tiempo de visita para todos los pacientes es menor a las 4 horas, asimismo, todos los pacientes en todos los clústeres (tablas 11 y 12) son atendidos dentro de las horas límite; sin embargo, los pacientes no atendidos superan el 40% en la mayoría de casos. Cabe resaltar que una parte de la solución consiste en la ruta exacta que debe tomar la ambulancia; esta ruta se visualiza como una lista de los hospitales y la cantidad de pacientes atendidos en cada hospital; asimismo, se programó una función para traducir el número de paciente con el PMA al que corresponde.

Tabla 12

Resumen de los pacientes atendidos de la solución para los clústeres 4, 5 y 6

Clúster	4			5			6		
	20%	50%	70%	20%	50%	70%	20%	50%	70%
Capacidad									
Tiempo promedio de visita (horas)	1.415	1.361	1.357	1.527	1.915	2.047	0.848	1.394	0.225
Tiempo máximo de visita (horas)	3.288	3.688	3.517	3.546	3.921	3.954	2.109	3.356	3.223
Cantidad pacientes atendidos	1196	2976	4173	1053	2627	3678	266	663	928
Cantidad pacientes no atendidos	4 459	2 679	1 482	5 593	4 019	2 968	6 761	6 364	6 099
Total de pacientes	5 655	5 655	5 655	6 646	6 646	6 646	7 027	7 027	7 027

En la tabla 13, se muestra una de las rutas generadas por el modelo, la cual pertenece a la ambulancia número 0 del clúster 5 y escenario con capacidad 20%.

Tabla 13

Ambulancia 0 del clúster 5 y escenario con capacidad 20%

N° ambulancia	Ruta
0	['HOSP_11', 'PMA_22', 'HOSP_100', 'PMA_19', 'HOSP_18', 'PMA_21', 'HOSP_96', 'PMA_20', 'HOSP_62', 'PMA_20', 'HOSP_18', 'PMA_22', 'HOSP_60', 'PMA_19', 'HOSP_19', 'PMA_20', 'HOSP_58', 'PMA_19', 'HOSP_17', 'PMA_20', 'HOSP_19', 'PMA_20', 'HOSP_17']

Las soluciones de esta metaheurística presentan ventajas como tiempos de visita dentro del límite de la ventana de tiempo, -cuatro horas-, no sobrepasa la capacidad de hospitales y se logran atender un número de pacientes muy cercano a la capacidad de los hospitales; sin embargo, también presenta desventajas como el tiempo de corrida en algunos clústeres con muchos puntos de atención, debido a que la cantidad de ambulancias fue hallada empíricamente, por tanto, no se puede afirmar que la solución sea la óptima.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El historial de sismos de Lima Metropolitana y Callao muestra que varios de los movimientos telúricos fueron destructivos, en particular el terremoto de 1742 fue uno de los más severos. Según PREDES (2009) un futuro terremoto en la metrópoli ocasionaría un tsunami que inundaría la zona costera del Callao. Asimismo, La vulnerabilidad de algunos distritos como San Juan de Lurigancho, Puente piedra y Carabaylo es muy alta comparada con el promedio de distritos. Este panorama conduce a lo urgentes que es activar rápidamente los planes de contingencia frente a sismos para Lima Metropolitana y Callao para que la acción de los mismos sea oportuna y evite la mayor cantidad de muertes posible.

El modelo de programación entera mixta propuesto es NP-difícil, por tanto, el tiempo para obtener la solución óptima es demasiado extenso, razón por la cual no es viable aplicarlo a la solución del problema formulado en esta tesis. Para resolver esta dificultad, se optó por una adaptación de la heurística propuesta por Talarico, Meisen y Sörensen (2014) y en esta tesis se toma en cuenta las limitaciones de tiempo de los pacientes y la función objetivo de maximizar la cantidad de pacientes atendidos. Dicha heurística pudo solucionar el traslado de pacientes en todos los clústeres; sin embargo, en algunos casos en donde la cantidad de nodos es grande, el tiempo de ejecución supera las tres horas; por lo que no sería posible utilizar el agrupamiento actual en una etapa de respuesta.

Por otro lado, se logró cumplir las metas de atención a los pacientes, es decir, se atiende una cantidad de pacientes igual a la capacidad de los hospitales para cada caso. Por ejemplo, en el caso de una capacidad de 20% en todos los hospitales, se logró atender a 2 941 pacientes, en el caso de una capacidad de 50% se logró atender a 7 294 pacientes y en el caso de una capacidad de 70% se logró atender a 10 269 pacientes. Asimismo, todos los tiempos de visita hacia los pacientes son menores a cuatro horas. El tiempo promedio de atención para el caso con capacidad 20% fue de 1.5 horas; para el caso con 50% fue de 1.6 horas y para el caso de 70% fue de 1.6 horas.

Se concluye que debido al alto peligro sísmico y alta vulnerabilidad de los distritos de Lima Metropolitana el desarrollo de los planes del gobierno en materia de respuesta ante un sismo de gran magnitud resulta de suma importancia para reducir el número de víctimas mortales que resultarían del desastre. La aplicación de la heurística desarrollada en esta tesis podrá contribuir al cumplimiento de esa finalidad. Cabe resaltar que la solución obtenida de este algoritmo satisface todas las restricciones propuestas; sin embargo, en un entorno de logística humanitaria, la ejecución de esta heurística podría tomar más tiempo del que se dispone; por otro lado, es posible mejorar los tiempos de ejecución si se cuenta con clústeres con menor cantidad de nodos.

4.2 Recomendaciones

Este estudio podría servir como base para el transporte de víctimas masivas en caso de otros desastres naturales y podría aplicarse en las provincias del país.

Se recomienda obtener información acerca de la cantidad de camas de las clínicas, de esta manera se calcularían las rutas con mayor precisión.

Se aconseja formar alianzas con SAMU para obtener las ambulancias necesarias para cada hospital rápidamente.

Con respecto a la resolución del modelo, se recomienda generar clústeres con menos nodos; es decir, equilibrar la carga de pacientes que serán atendidos en los hospitales de la zona a la que pertenecen; de esta manera la heurística se ejecutaría en menos tiempo para obtener una solución oportuna para la etapa de respuesta ante desastres.

Es importante recopilar información acerca de la cantidad de ambulancias que posee cada hospital o clínica, de esta manera se calcularían las rutas y la cantidad de atendidos con mayor precisión.

Se recomienda establecer los puntos de los EMT y la capacidad de atención en cada uno con anterioridad para que puedan ser tomados en cuenta en el modelo.

Finalmente, conocer la información sobre las comorbilidades de la población permitiría conocer con detalle los cuidados que la población necesitaría y las respectivas capacidades para atender este grupo de emergencias que no se tomaron en cuenta en esta tesis.

Referencias

- Bambarén, C., Uyen, A., & Rodriguez, M. (2017). Estimation of the Demand for Hospital Care After a Possible High-Magnitude Earthquake in the City of Lima, Peru. *Prehospital and disaster medicine*, 32(1), 106–111. doi: 10.1017/S1049023X16001254
- Bartels, S. A., & VanRooyen, M. J. (2012). Medical Complications associated with earthquakes. *The Lancet*, 379(9817), 748-757. doi: 10.1016/S0140-6736(11)60887-8
- 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*. Lima, Perú: Centro de Estudios y Prevención de Desastres. Recuperado de <https://www.predes.org.pe/wp-content/uploads/2017/10/Escenario-sobre-sismo-en-Lima-y-Callao.pdf>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2017). *Escenario de Riesgo por Sismo y Tsunami para Lima Metropolitana y la Provincia constitucional del Callao*. Setiembre 2017. Recuperado de <https://dimse.cenepred.gob.pe/er/sismos/ESCENARIO-SISMO-TSUNAMI-LIMA-CALLAO.pdf>
- Centre of Research on the Epidemiology of Disasters. (s. f.). [Base de Datos]. *The International Disaster Database EM-DAT*. Recuperado de <https://www.emdat.be/database>
- Chen, X., Zhong, H., Fu, P., Hu, Z., Qin, W., & Tao, Y. (2011). Infections in crush syndrome: a retrospective observational study after the Wenchuan earthquake. *Emergency Medicine Journal*, 28(1), 14–17. doi: 10.1136/emj.2009.077859
- Cooperazione Internazionale. (2010). *Zonificación Sísmico-Geotécnica para el Centro Histórico de Lima*. Lima, Perú: Autor
- Gunst, M., Ghaemmaghami, V., Gruszecki, A., Urban, J., Frankel, H., & Shafi, S. (2010). Changing epidemiology of trauma deaths leads to a bimodal distribution. *Actas (Baylor University Medical Center)*, 23(4), 349–354. doi: 10.1080/08998280.2010.11928649
- Heredia, I. (2020). *Revisión de la literatura de logística humanitaria y de modelos matemáticos para el reparto de bienes de ayuda humanitaria* (Trabajo de investigación, Pontificia Universidad Católica del Perú). Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación PUCP.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2009). *Resumen Ejecutivo: Lecciones Aprendidas del Sur - Sismo de Pisco, 15 Agosto 2007*. Mayo 2009. Lima, Perú: Instituto Nacional

- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2011). *Plan de operaciones de emergencia para el área Metropolitana de Lima y la Región del Callao*. Febrero 2011. Lima, Perú: Instituto Nacional de Defensa Civil. Recuperado de <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1752/doc1752-contenido.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2017). *Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8Mw*. Lima, Perú: Instituto Nacional de Defensa Civil. Recuperado de <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201711231521471-1.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2019a). [Base de datos]. *Matriz de Base de Datos de Emergencias y Desastres Periodo 2003-2018*. Lima, Perú: Instituto Nacional de Defensa Civil. Recuperado de https://www.indeci.gob.pe/compend_estad/2019/index.html
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2019b). *Plan de Contingencia Nacional Ante Sismo de Gran Magnitud Seguido de un Tsunami frente a la Costa de Central del Perú*. Lima, Perú: Instituto Nacional de Defensa Civil. Recuperado de <https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/PLAN-DE-CONTINGENCIA-NACIONAL-SISMO-Y-TSUNAMI-COSTA-CENTRAL-30.05.2019VF.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (s.f.). [Base de Datos]. *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. <http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (s.f.). *Infraestructura del sector salud por tipo de establecimiento, según departamento*. Recuperado de <http://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/health-sector-establishments/>
- Ministerio de Salud. (2016). *Plan de Contingencia del Sector Salud ante un Sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y en las Regiones de Callao y Lima*. Octubre 2016. Lima, Perú: Ministerio de Salud. Recuperado de <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/4179.pdf>
- Ministerio de Salud. (2017). [Base de Datos]. *Listado de Instituciones Prestadoras de Salud*. Recuperado de <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/minsa-ipress>
- Ministerio de Salud. (2019, 29 de mayo). SAMU lidera la atención prehospitalaria en caso de sismo de gran magnitud. [Comunicado de prensa]. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/28881-samu-lidera-la-atencion-prehospitalaria-en-caso-de-sismo-de-gran-magnitud>
- Ministerio de Salud. (s.f.). *Número de camas hospitalarias por habitante*. Recuperado de https://www.minsa.gob.pe/reunis/recursos_salud/index_camias_hospitalarias.asp

- Pérez, I., Esteban, M., Fernández, A., Morel, I., & Rodríguez, H. (2022). El puesto médico avanzado en catástrofes y accidentes de múltiples víctimas. *Ocronos*, 5(2), 41-42. Recuperado de: <https://revistamedica.com/puesto-medico-avanzado/>
- Talarico, L., Meisel, F., & Sörensen, K. (2014). Ambulance routing for disaster response with patient groups. *Computers & Operations Research*, 56, 120-133. doi: 10.1016/j.cor.2014.11.006
- Tavera, H. (2021). #EstemosListos | Hernando Tavera de IGP: “Los sismos no saben de pandemias, solo ocurren”/Entrevistado por Gladys Pereyra Colchado. *El Comercio*. Recuperado de <https://elcomercio.pe/lima/sucesos/estemoslistos-hernando-tavera-presidente-de-igp-los-sismos-no-saben-de-pandemias-solo-ocurren-noticia/?ref=ecr>
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem* (1a ed.). Filadelfia, Estados Unidos: Sociedad de Matemáticas Industriales y Aplicadas.

