

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**LOCALIZACIÓN DE ALBERGUES Y EVACUACIÓN DE
PERSONAS PARA CASOS DE INUNDACIÓN EN LA COSTA
PERUANA UTILIZANDO MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN
MULTICRITERIO**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Industrial**, que presenta el bachiller:

Kengy Adrian Velasquez Lopez

ASESOR: Ing. Christian S. Cornejo Sánchez

Lima, julio de 2018



Dedicado a todos los que algún momento sufrieron daños a causa de desastres naturales. A mis padres y hermanos que me dieron su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, el Ing. Christian Cornejo, quien me ha guiado y asesorado en todo el proceso de investigación.

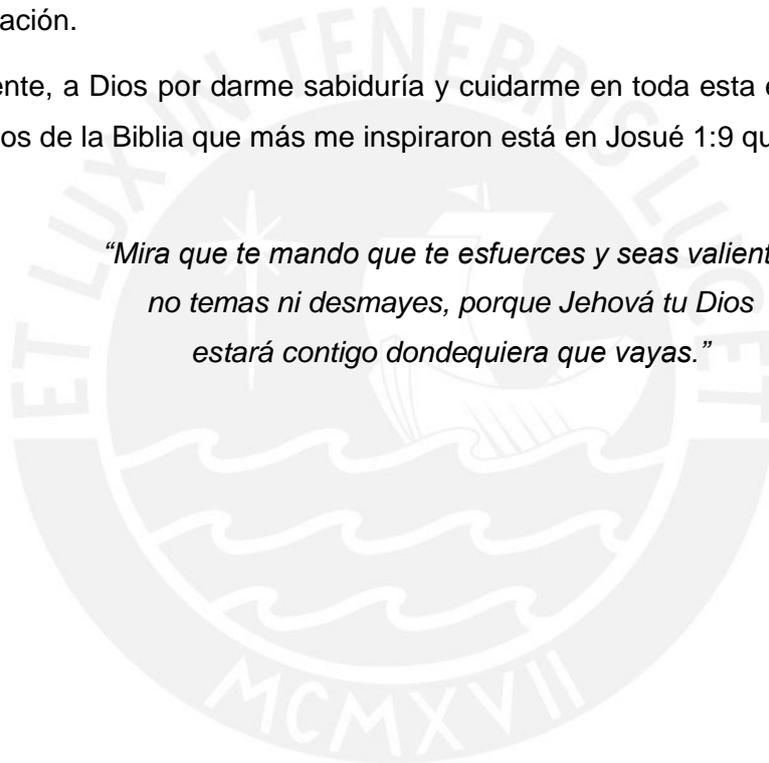
A las autoridades del INDECI, que colaboraron en compartir valiosa información y mostraron su apoyo en la elaboración de esta tesis.

A mis padres, Karin y Moises, por darme las fuerzas necesarias en momentos clave. Por darme su amor incondicional y creer en mí.

A mis amigos cercanos que me dieron muchos ánimos en continuar con la investigación.

Finalmente, a Dios por darme sabiduría y cuidarme en toda esta etapa. Uno de los versículos de la Biblia que más me inspiraron está en Josué 1:9 que dice:

*“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente;
no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios
estará contigo dondequiera que vayas.”*



RESUMEN

Esta investigación surge del análisis de los desastres mundiales a nivel mundial y de América Latina lo cual revela un aumento considerable de los desastres causados por las inundaciones. En el Perú, el litoral de Lima y Callao concentra una elevada población expuesta a inundaciones por causa de un tsunami, asimismo, Lima y Callao revela condiciones de vulnerabilidad social; estos dos factores señalan la posibilidad de un desastre natural desencadenado por un tsunami. Por el lado institucional, el INDECI cuenta con planes de prevención ante emergencias cuyos procedimientos de toma de decisiones pueden mejorarse mediante el uso de técnicas de optimización.

Ante un posible tsunami, un estudio realizado por la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) de la Marina de Guerra del Perú, con la colaboración del Centro Peruano Japonés de Mitigación e Investigación de Desastres (CISMID) simularon los efectos de un terremoto en Lima Metropolitana. Con base en ese estudio y con la información del Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres (SIRAD), se identificó la cantidad de afectados, los albergues para la evacuación y los almacenes para trasladar ayuda humanitaria. El problema a resolver es de minimizar el tiempo de traslado de los afectados hacia albergues y minimizar los costos de transporte de la ayuda humanitaria desde los almacenes hasta los albergues en donde se alojarán los afectados.

En esta tesis se propone técnicas de optimización multicriterio para la resolución del modelo matemático y se obtuvo soluciones óptimas sobre la frontera de Pareto. Luego, se escogió una solución óptima utilizando el método ELECTRE para cada escenario propuesto. Con las soluciones encontradas, se determinó las rutas de evacuación de las personas y la red de abastecimientos de ayuda humanitaria hacia los afectados que suman 89,972 y 234,232 personas para el primer y segundo escenario.

Por último, se concluye que para un terremoto de 8.5 Mw el tiempo promedio de evacuación de los afectados es 58.59 minutos, el costo de transporte es S/.8,207 y el volumen de ayuda humanitaria es 5,046 m³. Por otro lado, en un terremoto de 9.0 Mw el tiempo promedio de evacuación de los afectados es 128.81 minutos, el costo de transporte es S/.95,483 y el volumen de ayuda humanitaria es 13,137 m³. Los distritos de Callao, Lurín, Chorrillos y Ventanilla no cuentan con suficientes albergues para atender a los afectados.

TEMA DE TESIS



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero Industrial

ALUMNO : **KENGY ADRIAN VELÁSQUEZ LOPEZ**

CÓDIGO : 2010.0968.12

PROPUESTO POR : Ing. Christian S. Comejo Sánchez

ASESOR : Ing. Christian S. Comejo Sánchez

TEMA : LOCALIZACIÓN DE ALBERGUES Y EVACUACIÓN DE PERSONAS PARA CASOS DE INUNDACIÓN EN LA COSTA PERUANA UTILIZANDO MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO.

N° TEMA : # 1433

FECHA : San Miguel, 15 de febrero de 2018



JUSTIFICACIÓN:

Cerca del 20% de la población peruana corre riesgo de que sufra una inundación en sus viviendas (Comunidad Andina, 2009, p. 126)¹. Asimismo, el Perú ha sufrido varios casos de inundaciones los cuales generaron cuantiosas pérdidas materiales y víctimas. Uno de esos eventos de mayor impacto ocurrió en Loreto en el año 2012 que provocó 229412 damnificados, 5 fallecidos y una pérdida de 40 millones de nuevos soles en el sector agrario (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI] et al., 2013)².

Los impactos socioeconómicos y ambientales de los desastres son crecientes, reduciendo las capacidades de sostenibilidad y de desarrollo, (INDECI, 2011, p. 5)³. Debido a esta problemática, se debe generar planes de acción con el fin de mitigar los impactos y brindar atención a los afectados. Durante estos eventos catastróficos, la atención a los damnificados es interrumpida por diferentes factores como la falta de accesibilidad a la información o por los daños en la red de distribución de bienes de ayuda. Un concepto que propone dar soluciones es la logística humanitaria cuya principal función es dar soporte

¹ Comunidad Andina. (2009). *Atlas de las dinámicas del territorio andino: población y bienes expuestos a amenazas naturales*. Secretaría General de la Comunidad Andina. Cali, Colombia.

² Instituto Nacional de Defensa Civil, Cooperazione Internazionale, Cruz Roja Peruana, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios de Naciones Unidas, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Plan Internacional. (2013). *Lecciones Aprendidas Loreto - Intervención frente a la emergencia por inundaciones en Loreto en el año 2012*. Lima, Perú.

³ Instituto Nacional de Defensa Civil. (2011). *Manual de Estimación del Riesgo ante Inundaciones Fluviales*. Perú.

i

Av. Universitaria N° 1801, San Miguel
T: (511) 626 2000

www.pucp.edu.pe



operativo ante la ocurrencia de desastres considerando las áreas críticas dentro de una emergencia como la salud, comida, refugios, agua y recuperación (Thomas, 2003)⁴.

Para la atención de la población afectada por las inundaciones, es necesaria una rápida respuesta médica a los heridos y localizar los albergues temporales para la evacuación de la población. Por tal motivo, luego del desastre es recomendable optimizar el sistema de distribución con los objetivos de trasladar a los afectados lo más pronto posible y disminuir los costos que se incurren en la ejecución del plan de acción. Además, se debe conocer la cantidad de almacenes y albergues necesarios para la atención de los damnificados, los flujos de transporte necesarios para atender a la mayor parte de la población damnificada y los traslados de afectados durante la evacuación; estos son tres de los múltiples aspectos de la compleja problemática que caracteriza los desastres provocados por las inundaciones.

Debido a la complejidad que surge cuando se ejecuta un plan de logística humanitaria, diversos estudios proponen la utilización de herramientas de la Investigación de Operaciones para diseñar mejor la toma de decisiones (Argollo, Bandeira y Campos, 2013)⁵. En esta tesis, para abordar la problemática de las inundaciones en la costa de la ciudad de Lima y Callao, se propone utilizar las siguientes herramientas de la Investigación de Operaciones: optimización lineal entera para formular el problema en un modelo matemático e intentar encontrar soluciones óptimas; optimización multicriterio para generar un conjunto de soluciones óptimas debido a que el modelo matemático tiene dos funciones objetivos y el uso del método ELECTRE I para encontrar la solución más eficiente.

OBJETIVO GENERAL:

Formular y resolver un modelo que permita optimizar el tiempo de rescate de las personas en inundaciones, así como disminuir los costos involucrados en la localización de albergues y evacuación de damnificados mediante la utilización de técnicas de optimización con varias funciones objetivos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Describir algunos conceptos relacionados a los desastres naturales e inundaciones.
- Presentar un panorama sobre las inundaciones en el Perú, en particular, resaltando sus causas, consecuencias, y la vulnerabilidad del Perú y de la costa de Lima Metropolitana y Callao frente a inundaciones.
- Explorar la literatura académica sobre programación lineal, programación entera y programación multicriterio aplicadas a contextos de logística humanitaria e inundaciones.
- Identificar las zonas afectadas de Lima, albergues y almacenes potenciales de bienes de ayuda para un determinado evento catastrófico.

⁴ Thomas, A. (2003). *Humanitarian Logistics: Enabling Disaster Response*. Fritz Institute.

⁵ Argollo, S., Bandeira, R., & Campos, V. (2013). *Operations Research in Humanitarian Logistics Decisions. Select Proceedings 13th World Conference on Transport Research*, 1-18.



- Formular un modelo matemático multiobjetivo para minimizar el costo de transporte de los bienes de ayuda humanitaria desde los almacenes hacia los albergues y que simultáneamente minimice el tiempo de rescate de las personas.
- Resolver el modelo con herramientas computacionales.
- Seleccionar la alternativa más eficiente utilizando el método ELECTRE I para toma de decisiones multicriterio.

PUNTOS A TRATAR:

a. Marco teórico.

Se presentará los conceptos generales de la logística y gestión frente a desastres con la finalidad de conocer los principales procesos que se sugiere ejecutar en el transcurso de una emergencia de esa naturaleza. Además, se explicará la teoría de la programación lineal para la resolución de problemas, la optimización multiobjetivo y algunos métodos para la toma de decisiones multicriterio.

b. Descripción y análisis de la problemática.

Se efectuará un análisis y diagnóstico de la problemática de las inundaciones en el Perú, presentando en primer lugar un registro de las inundaciones ocurridas en el Perú desde 1975; cuáles son las causas de las inundaciones en el Perú; las consecuencias en términos de personas afectadas y damnificadas, y cuáles son las zonas de mayor vulnerabilidad. Se presentará también una reseña de la gestión de riesgo de desastres en el Perú y las actividades críticas durante una emergencia.

c. Formulación del modelo.

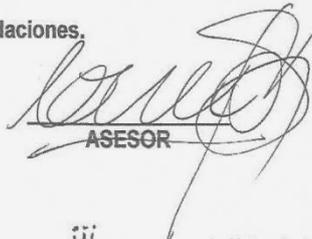
Se presentará una revisión de la literatura académica sobre programación lineal, programación entera y programación multicriterio aplicadas a contextos de logística humanitaria e inundaciones, en particular, sobre localización de albergues y evacuación de personas. Asimismo, se muestra la metodología que se utilizará para la recolección de la información necesaria para el modelo. Finalmente, se formulará un modelo matemático utilizando un modelo bicriterio con los objetivos de minimizar los costos de transporte de bienes de ayuda humanitaria hacia los albergues y que simultáneamente minimice el tiempo de rescate de los damnificados. El escenario de análisis y aplicación del modelo será la costa de Lima Metropolitana y Callao

d. Solución y discusión de resultados.

Se resolverá el modelo matemático con paquetes informáticos para intentar obtener soluciones óptimas al modelo matemático propuesto. Luego, los resultados se analizarán utilizando algunas técnicas para la toma de decisiones con varios criterios.

e. Conclusiones y Recomendaciones.

Máximo: 100 páginas


ASESOR



ÍNDICE GENERAL

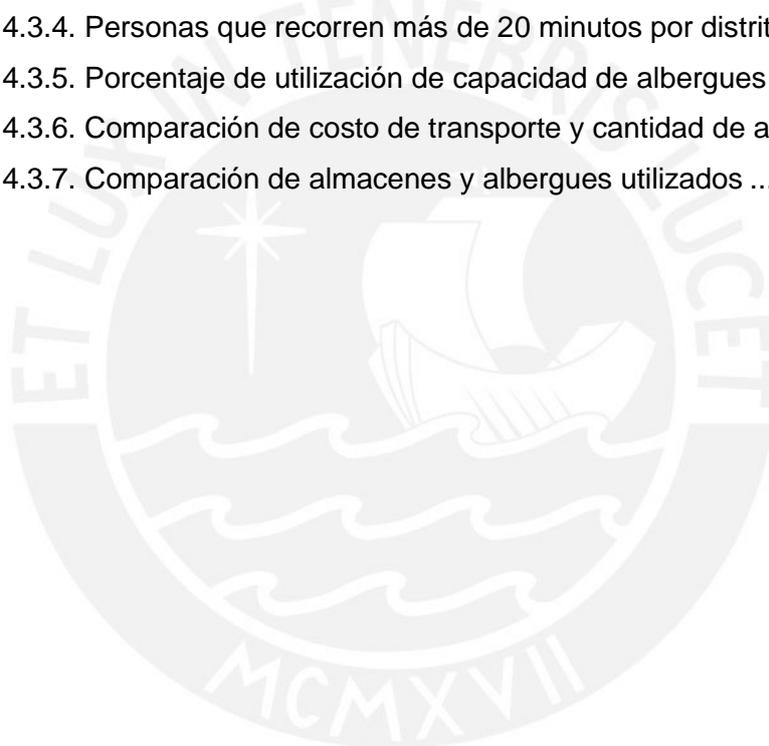
TEMA DE TESIS	i
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE GRÁFICOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
1. CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	1
1.1. Logística y gestión ante desastres	2
1.1.1. Desastre Natural	2
1.1.2. Gestión de Desastres	3
1.1.3. Respuesta Humanitaria	6
1.1.3.1. Criterios para la implementación de asistencia mutua	6
1.1.3.2. Modalidades de asistencia humanitaria	7
1.2. Introducción a la Programación Lineal	8
1.2.1. Programación Lineal	8
1.2.2. Programación Entera y Programación Lineal Mixta	10
1.2.3. Análisis de las soluciones de la programación lineal	11
1.3. Optimización multiobjetivo	12
1.3.1. Definición de un problema de optimización multiobjetivo	12
1.3.2. Conceptos básicos	13
1.3.3. Métodos para hallar óptimos de Pareto	13
1.4. Ayuda a las decisiones multicriterio	14
1.4.1. Metodologías del MCDA	14
1.4.2. Método ELECTRE	14
1.4.3. Análisis de concordancia	15
1.4.4. Algoritmo ELECTRE I	15
2. CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	17
2.1. Concepto y clasificación de la inundación	17
2.1.1. Conceptos	19
2.1.2. Clasificación de las inundaciones	19
2.2. Inundaciones en el Perú	21
2.2.1. Registro de inundaciones	21
2.2.2. Causas de inundaciones en el Perú	21
2.2.3. Consecuencias de inundaciones en el Perú	24
2.3. Zonas vulnerables por inundación en el Perú	26
2.4. Gestión del riesgo de desastres en el Perú	28

2.4.1.	Procesos de la gestión reactiva	30
2.4.2.	Proceso de respuesta.....	31
2.5.	Actividades críticas durante una emergencia.....	33
2.5.1.	Plan de evacuación en caso de desastres.....	33
2.5.2.	Albergues provisionales.....	34
2.6.	Conclusión del análisis	35
3.	CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL MODELO	37
3.1.	Descripción del problema	37
3.1.1.	Revisión de la literatura	37
3.1.2.	Planteamiento del problema	38
3.1.3.	Metodología de trabajo	44
3.1.4.	Supuestos	54
3.2.	Formulación del modelo	55
3.3.	Descripción de escenarios.....	60
3.3.1.	Descripción del primer escenario.....	60
3.3.2.	Descripción del segundo escenario	63
4.	CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	66
4.1.	Resolución y análisis de resultados del primer escenario	66
4.2.	Resolución y análisis de resultados del segundo escenario.....	75
4.3.	Comparación de escenarios	82
5.	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
5.1.	Conclusiones.....	87
5.2.	Recomendaciones.....	88
	BIBLIOGRAFÍA.....	90

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1. Matriz de peligro y vulnerabilidad	5
Gráfico 1.2. Tipos de soluciones en programación lineal	11
Gráfico 2.1. Frecuencia de desastres naturales en el mundo	17
Gráfico 2.2. Total de afectados y pérdidas económicas por desastres naturales	18
Gráfico 2.3. Frecuencia de inundaciones en América Latina	19
Gráfico 2.4. Frecuencia de inundaciones en el Perú.....	23
Gráfico 2.5. Principales causas de las inundaciones	23
Gráfico 2.6. Cantidad de personas afectadas y damnificadas por inundación.....	25
Gráfico 2.7. Cantidad de viviendas destruidas y cultivos perdidos en hectáreas por inundaciones en el Perú	26
Gráfico 2.8. Procesamiento cartográfico y de SIG	27
Gráfico 2.9. Cantidad de personas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos asociados a lluvias intensas por departamentos del Perú.....	28
Gráfico 2.10. Situación económica del Perú por departamentos en el 2014.	36
Gráfico 3.1. Zona de inundación en caso de terremoto 8.5 Mw en El Callao	39
Gráfico 3.2. Zona de inundación en caso de terremoto 8.5 Mw y 9 Mw en el Lima Metropolitana.....	41
Gráfico 3.3. Albergues potenciales en Lima Metropolitana	43
Gráfico 3.4. Ubicación de almacenes de empresas de logística de alimentos	44
Gráfico 3.5. Visor SIRAD de las manzanas.....	45
Gráfico 3.6. Delimitación distrital de zonas inundadas en caso de inundación.....	46
Gráfico 3.7. Agrupación de las manzanas afectadas en el distrito de Ventanilla utilizando el criterio de distancias	46
Gráfico 3.8. Agrupación de dos zonas por el criterio cantidad de personas en el distrito Punta Hermosa.....	47
Gráfico 3.9. Separación de zona inundada por el criterio personas en el distrito del Callao	48
Gráfico 3.10. Zonas inundadas en el litoral de Lima Metropolitana.	52
Gráfico 3.11. Selección de albergues potenciales.....	53
Gráfico 3.12. Selección de almacenes potenciales. Plataforma ArcGIS.....	53
Gráfico 3.13. Representación de la red de distribución ante una inundación.	56
Gráfico 4.1.1. Frontera de Pareto para el problema de inundación. Primer escenario	72
Gráfico 4.1.2. Tabla de asignación de afectados desde las zonas inundadas hacia los albergues. Resultados del primer escenario	74

Gráfico 4.1.3. Tabla de asignación de ayuda humanitaria desde los almacenes hacia los albergues en m3. Resultados del primer escenario.....	75
Gráfico 4.2.1. Frontera de Pareto para el problema de inundación. Segundo escenario.....	79
Gráfico 4.2.2. Tabla de asignación de afectados desde las zonas inundadas hacia los albergues. Resultados del segundo escenario.....	81
Gráfico 4.2.3. Tabla de asignación de ayuda humanitaria desde los almacenes hacia los albergues en m3. Resultados del segundo escenario	82
Gráfico 4.3.1. Número de personas afectadas por distrito	83
Gráfico 4.3.2. Histograma de tiempo de evacuación del primer escenario.....	83
Gráfico 4.3.3. Histograma de tiempo de evacuación del segundo escenario	84
Gráfico 4.3.4. Personas que recorren más de 20 minutos por distritos	85
Gráfico 4.3.5. Porcentaje de utilización de capacidad de albergues por distritos	85
Gráfico 4.3.6. Comparación de costo de transporte y cantidad de afectados.....	86
Gráfico 4.3.7. Comparación de almacenes y albergues utilizados	86



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de los desastres	2
Tabla 3.1 Recursos esenciales para la respuesta y atención de una emergencia...	42
Tabla 3.2 Relación de bienes de ayuda humanitaria.....	42
Tabla 3.3 Cantidad de personas afectadas según la zona de inundación.....	61
Tabla 3.4 Capacidad de los albergues.....	61
Tabla 3.5 Capacidad de almacenes.....	62
Tabla 3.6 Bienes de ayuda humanitaria.....	62
Tabla 3.7 Cantidad de personas afectadas según la zona inundación.....	63
Tabla 3.8 Albergues afectados por un tsunami de 9.0 Mw.....	64
Tabla 3.9 Almacenes afectados por un tsunami de 9.0 Mw	64
Tabla 4.1.1 Tabla de resultados de corrida.....	69
Tabla 4.1.2 Tabla de resultados de las simulaciones del primer escenario.....	71
Tabla 4.1.3 Matriz homogeneizada de clasificaciones. Primer escenario.....	72
Tabla 4.1.4 Matrices de concordancia y discordancia. Primer escenario	72
Tabla 4.1.5 Matrices de dominancia de alternativas. Primer escenario.....	73
Tabla 4.1.6 Ranking de mejores alternativas. Primer escenario.....	74
Tabla 4.2.1 Tabla de resultados de las simulaciones del segundo escenario	78
Tabla 4.2.3 Matriz de concordancia. Segundo escenario.....	79
Tabla 4.2.4 Matriz de discordancia. Segundo escenario.....	80
Tabla 4.2.5 Matrices de dominancia de alternativas. Segundo escenario	80
Tabla 4.2.6 Ranking de mejores alternativas. Segundo escenario	80

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación tiene como objetivos formular y resolver un modelo matemático que reduzca el tiempo de evacuación de la población afectada por un tsunami en Lima y Callao. Con base en la información del Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres (SIRAD), se localizan albergues potenciales donde los afectados pueden evacuar y también planificar una red de abastecimiento de ayuda humanitaria para cada albergue.

En el primer capítulo, se presentan la terminología correspondiente a la gestión de desastres. Asimismo, se abordan los conceptos de la programación lineal mixta y sus aplicaciones en el campo de la logística humanitaria. Además, se explica el método ELECTRE en el marco de la toma de decisiones multicriterio.

En el segundo capítulo, se analiza los casos de inundación en el Perú para identificar las principales causas e impactos. Se explica, además, los procedimientos de la gestión del riesgo de desastres en el Perú con énfasis en la gestión reactiva para la asistencia de damnificados. Luego, se realiza un diagnóstico de las zonas más vulnerables del país y se sustenta la elección de Lima y Callao como objeto de estudio.

En el tercer capítulo, se identifica el problema de evacuación de personas en caso de tsunami y se analiza la situación de Lima y Callao. Luego, se propone una metodología de obtención de datos y se presenta los supuestos del modelo. Por último, se formula el modelo de optimización multiobjetivo para dos escenarios de tsunami.

En el cuarto capítulo, se realiza una serie de iteraciones en la resolución del modelo de cada escenario para obtener las soluciones óptimas formando la frontera de Pareto. Además, se hace la elección de una solución para cada escenario utilizando el método ELECTRE I. Con las soluciones encontradas, se determina las rutas de evacuación de las personas y la red de abastecimientos de ayuda humanitaria hacia los afectados.

Por último, se discute las conclusiones encontradas en la planificación de evacuación en caso de tsunami en Lima y Callao.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. Logística y gestión ante desastres

Antes de abordar la problemática de las inundaciones, se definirá algunos conceptos claves sobre la logística humanitaria.

1.1.1. Desastre natural

Se define desastre como una situación o evento en el cual las capacidades locales son sobrepasadas, necesitando una respuesta a nivel nacional o internacional para la asistencia externa (*Centre of the Research on the Epidemiology of Disasters* [CRED], 2018a). El desastre natural es un acontecimiento imprevisto y repentino que a menudo causa daños, destrucción y sufrimiento humano producto de eventos naturales como ventisca, terremotos, inundaciones, entre otros (CRED, 2018a).

Debido a la gran cantidad de tipos de desastres naturales es necesario clasificarlos. Uno de los criterios de clasificación es según su origen, a saber, geofísicos, meteorológicos, hidrológicos, climatológicos y biológicos (Instituto de Defensa Civil [INDECI], 2009). En la tabla 1.1, se muestra los subgrupos, definición y ejemplos de cada uno.

Tabla 1.1. Clasificación de los desastres

Subgrupo de desastre	Definición	Tipos de desastre
Geofísico	Eventos inducidos en la superficie terrestre	Terremotos, erupciones, remoción de masas
Meteorológico	Eventos causados por procesos atmosféricos de corta duración	Tormentas
Hidrológico	Causados por la desviación del ciclo de agua y sus corrientes por el cambio de vientos	Inundaciones, huaycos
Climatológico	Eventos causados por procesos atmosféricos de larga duración	Temperaturas extremas, incendios, sequías
Biológico	Desastres causados por la exposición de organismos vivos a los gérmenes y sustancias tóxicas	Epidemia, infección por insectos

Elaboración propia

Cada vez que ocurre un desastre, se generan numerosas pérdidas de vidas incluso después del evento natural así como otras repercusiones: brotes de enfermedades,

plagas, réplicas, desesperación de los afectados, entre otras. Las pérdidas materiales afectan la situación económica del área afectada y exige una inversión en la población afectada. Por lo tanto, se concluye que los desastres son interrupciones graves en el proceso de desarrollo de la comunidad, ya que alteran e incluso frenan su habitual desempeño (INDECI, 2009).

1.1.2. Gestión de Desastres

“La Gestión del Riesgo de Desastre (GRD) es el conjunto de decisiones administrativas, de organización y conocimientos operacionales desarrollados por comunidades para implementar políticas y estrategias con el fin de reducir el impacto de amenazas naturales y de desastres ambientales y tecnológicos” (Programa de Preparación ante Desastres del Departamento de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Comisión Europea [DIPECHO], 2012). La reducción del riesgo de desastres es una estrategia fundamental para el desarrollo sin interrupción. Por ello, diversos gobiernos se han trazado la meta de generar estrategias de reducción y respuesta ante desastres.

A continuación se detallan tres términos para comprender los procesos ante una gestión de riesgos (INDECI, 2009).

Peligro

Se refiere a la probabilidad de ocurrencia de que un desastre, de origen natural o inducido por el ser humano, puede ocurrir en un periodo y zona determinada. Un ejemplo resaltante de los peligros son las inundaciones y deslizamientos resultantes de los procesos de deforestación y degradación o deterioro de cuencas, erosión costera por la destrucción de manglares e inundaciones urbanas por falta de adecuados sistemas de drenaje (INDECI, 2009). En esa situación se observa claramente la interacción de la naturaleza con la acción humana que desencadena la posibilidad de un desastre.

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es el grado de resistencia y/o exposición de un elemento frente a la ocurrencia de un peligro. Puede ser física, social, económica, cultural e ideológica, institucional y política, o de otro tipo. Asimismo, se refiere a una serie de características que predisponen a una persona, un grupo o una sociedad a sufrir daños frente al impacto de un peligro y que dificultan su recuperación en el corto y largo plazo (INDECI, 2009).

Los factores de vulnerabilidad pueden revertirse con capitales o recursos dirigidos al fortalecimiento de los medios de vida, así la mejor gestión de todas las fortalezas y recursos disponibles dentro de una comunidad o sociedad pueden reducir el nivel de riesgo o los efectos de un desastre. Es importante además de los recursos, el desarrollo de las capacidades que permitan reforzar los medios de vida y aumentar la protección frente a la ocurrencia de un evento peligroso (INDECI, 2009).

Riesgo

Es una estimación o evaluación de las probables pérdidas de vidas y daños a los bienes materiales en una situación de amenaza. Debido a que es una función del peligro y de la vulnerabilidad, el riesgo solo puede existir al ocurrir un peligro en determinadas condiciones de vulnerabilidad, en un espacio y tiempo particular. Asimismo, el peligro y la vulnerabilidad son mutuamente condicionados. Es importante resaltar que si una comunidad aumenta su resiliencia entonces reducirá sus condiciones de vulnerabilidad y nivel de riesgo (INDECI, 2009).

Utilizando los términos previamente explicados, el rol que cumple la GRD se comprende a través de cuatro procesos que a continuación se explican.

1. Estimación de riesgos

La estimación del riesgo es el conjunto de acciones y procedimientos que se realizan en un determinado centro poblado o área geográfica para levantar información sobre la identificación de los peligros naturales y/o tecnológicos y analizar las condiciones de vulnerabilidad. También para determinar o calcular el riesgo en términos de vidas perdidas e infraestructura (INDECI, 2009).

Como ya se explicó, los riesgos son el resultado de la relación entre peligros y vulnerabilidad por lo que esta estimación se basa en hacer un análisis acerca de la situación histórica de los peligros y la situación actual de la vulnerabilidad de la zona. Con la información obtenida, se elabora índices de riesgos y se identifica los más elevados. En el gráfico 1.1 se presenta una matriz sobre la estimación de riesgos basado en el criterio de vulnerabilidad y peligro (INDECI, 2009).

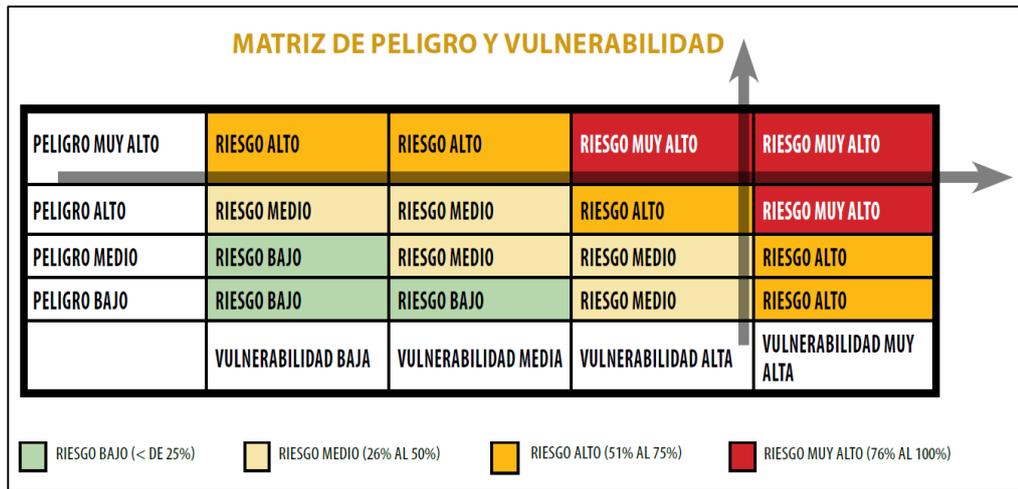


Gráfico 1.1. Matriz de peligro y vulnerabilidad
Fuente: INDECI (2009)

2. Reducción del riesgo de desastres

Para enfrentar las posibles amenazas y vulnerabilidades en el futuro, se proponen medidas que intentan reducir el riesgo de desastres la cuales según el INDECI (2009) agrupa las acciones de prevención, disminución de vulnerabilidades y preparación.

- La prevención específica abarca al conjunto de actividades y medidas para brindar protección permanente contra los efectos de un desastre. Incluye entre otras, medidas de ingeniería (construcciones sismo resistentes, protección ribereña y otras) y de legislación (uso adecuado de tierras y agua, ordenamiento urbano y otras).
- Una adecuada preparación, es decir, la planificación de acciones para las emergencias, el establecimiento de alertas y ejercicios de evacuación para una respuesta adecuada durante una emergencia o desastre.
- La preparación también abarca actividades y medidas tomadas anticipadamente para asegurar una respuesta eficaz ante el impacto de peligros, incluyendo la recopilación de información para la evacuación temporal de la población y propiedades en las áreas expuestas al peligro.

3. Respuesta

Es el conjunto de acciones y medidas aplicadas durante en el transcurso de una emergencia o desastre, para reducir sus efectos adversos. Contempla la evaluación de los daños, la asistencia con techo, rescate de personas, abrigo y alimentos a los damnificados, y la rehabilitación para la pronta recuperación temporal de los servicios básicos (agua, desagüe, comunicaciones, alimentación y otros). Además, se debe

evitar que surjan riesgos futuros que potencialmente podrían generar los desastres como son la hambruna, epidemia y otros (INDECI, 2009).

4. Reconstrucción

Después del desastre, empieza la fase de reconstrucción que consiste en la recuperación del área, tomando en cuenta las medidas de prevención y mitigación necesarias y tomando en cuenta las lecciones dejadas por el desastre (INDECI, 2009).

Los cuatro procesos mencionados contribuyen al propósito de la GRD que es reducir el impacto de los desastres.

1.1.3. Respuesta humanitaria

La respuesta o asistencia humanitaria es la intervención y provisión de ayuda durante un desastre con el objetivo de salvar vidas y cubrir las necesidades básicas de subsistencia de los afectados (Comité Andino para la Prevención y Atención de Desastres [CAPRADE], 2008).

El Comité Andino para la Prevención y Atención de Desastres señala que las experiencias en desastres ocurridos dejaron como lección aprendida que es necesario afinar mecanismos de coordinación y comunicación, para evitar que la administración de la asistencia humanitaria se convierta en un problema adicional dentro del desastre. Su tiempo de aplicación transcurre en las primeras semanas de respuesta al desastre, en las cuales, las operaciones de ayuda requieren una estrecha y máxima coordinación (CAPRADE, 2008).

1.1.3.1. Criterios para la implementación de asistencia mutua

El CAPRADE elaboró una lista de criterios que tienen como propósito hacer efectiva, eficaz y oportuna la asistencia humanitaria entre países, dadas las condiciones propias de cada uno de ellos. A continuación, se reseña un extracto de esos criterios (CAPRADE, 2008).

- **La declaratoria de estado de emergencia nacional y solicitud de ayuda humanitaria internacional:** ocurrido el desastre y una vez que el Gobierno haya emitido la respectiva declaratoria de emergencia y el llamamiento de ayuda internacional.
- **La evaluación de daños y análisis de necesidades deberá ser realizada sin demora por las autoridades del sistema nacional de prevención y atención de desastres en el país afectado:** el levantamiento de la información

preliminar del evento será el insumo necesario para una adecuada asistencia humanitaria. El país afectado enviará un informe, a través de los canales diplomáticos, con las necesidades preliminares.

- **Informar a los donantes tanto lo que se requiere como lo que no se desea recibir ni se necesita.**
- **Seguir los procedimientos de comunicación, coordinación y supervisión establecidos por las autoridades del país afectado por el desastre:** entre autoridades nacionales y representantes de los organismos donantes y otras organizaciones que participan en la asistencia humanitaria.
- **La ayuda de emergencia debe complementar las acciones del Estado afectado:** no se duplicarán los esfuerzos del Estado en la gestión de la ayuda humanitaria.
- **La asistencia humanitaria internacional debe cumplir estándares de calidad que cubran las necesidades de las comunidades afectadas:** en particular, se respetará también los aspectos culturales del país afectado.

1.1.3.2. Modalidades de asistencia humanitaria

El CAPRADE elaboró una lista las diferentes modalidades para asistir a una población afectada. A continuación, se reseña estas modalidades (CAPRADE, 2008).

- **Recursos humanos:** en caso de necesidad de personal con ciertas habilidades, conocimientos o equipamiento específico (rescate, logística, salud, comunicación), el país afectado deberá detallar su necesidad. Este personal contará con total autonomía operativa por al menos siete días o el tiempo que consideren durará la misión.
- **Maquinaria y equipos:** el país afectado deberá detallar las especificaciones técnicas de los equipos y maquinarias requeridos.
- **Medicamentos:** el país afectado es el responsable de enviar una lista con las características de presentación, concentración y demás condiciones de los medicamentos que se necesitan por la emergencia (de ser posible lo hará bajo el nombre genérico de los medicamentos). La fecha de caducidad deberá ser de al menos un año a partir de la fecha del envío.
- **La sangre o sus derivados:** se debe obtener a través de donantes nacionales. No se deberá solicitar a la comunidad internacional.

- **Elementos de supervivencia, alimentos y agua:** los alimentos donados deberán ser no perecederos y estar muy bien identificados. Se deberá realizar un plan de distribución de utensilios de cocina y combustible para la preparación de los alimentos. Asimismo, deberá verificarse la calidad del agua gestionada localmente para evitar la propagación de enfermedades infecciosas.
- **Techo y abrigo temporal:** el país afectado es el responsable de la solicitud de este tipo de ayuda solamente cuando las capacidades locales se hayan superado. Se preferirá solicitar dinero para la compra de soluciones temporales de vivienda en el mercado local o regional.
- **Ropa usada:** no se solicitará ropa usada. Si es necesario requerimientos de frazadas o colchones, se procurará adquirirlos localmente.
- **Hospitales de campaña:** el pedido deberá consultarse con el Ministerio de Salud y tener en cuenta los aspectos referentes a los hospitales de campaña.

1.2. Introducción a la programación lineal

La optimización de funciones es una tarea fundamental para utilizar mejor los recursos y decidir la mejor decisión ante eventos que puedan suceder. La formulación de un problema y la utilización de técnicas de optimización pueden llegar a tener resultados de gran impacto. Este capítulo pretende analizar los conceptos de programación para la resolución de modelos de optimización.

1.2.1. Programación lineal

A mediados del siglo XX, hubo un gran avance en el desarrollo científico de la programación lineal. Uno de sus primeros usos fue en la Segunda Guerra Mundial en la cual se asignaron recursos escasos en operaciones militares. Su efecto trasciende hasta la actualidad ya que ha permitido ahorrar millones de dólares a muchas compañías o negocios por sus diferentes aplicaciones (Dantzig, 1998).

Hiller & Lieberman (2010) definen la programación lineal de la siguiente manera:

La programación lineal utiliza un modelo matemático para describir el problema. El adjetivo lineal significa que todas las funciones matemáticas del modelo deben ser funciones lineales. En este caso, la palabra programación no se refiere aquí a términos computacionales; en esencia es sinónimo de planeación. Por lo tanto, la programación lineal involucra la planeación de las actividades para obtener un resultado óptimo; esto es, el resultado que mejor alcance la meta especificada —de acuerdo con el modelo matemático— entre todas las alternativas factibles. (p. 21)

Los problemas de programación lineal se componen generalmente de estas tres partes:

1. Variables de decisión: son las variables que se determinan a través de técnicas de optimización y que en ciertos contextos orientan la toma de decisiones.

2. Parámetros: son todos los datos necesarios para incluir en el modelo. Por ejemplo, pueden presentarse como costos, distancias, capacidad, etc.

3. Función objetivo: es una función lineal que expresa el objetivo de la optimización. Se maximiza o minimiza la función objetivo. Como ejemplo, se muestra una función objetivo de minimización:

$$\text{Min } z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

4. Restricciones: son las desigualdades o igualdades lineales que limitan los recursos y requerimientos en el modelo y acotan las soluciones óptimas del modelo. Tienen formas similares a las siguientes:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m$$

En las expresiones lineales anteriores, a_{ij}, b_i, c_i son valores que se asumen conocidos o también se les llama parámetros. El modelo pretende hallar los valores de x_j (variables de decisión) que optimicen la función objetivo sujeta a las restricciones.

5. Rango de existencia: las variables de decisión tienen cotas o un rango de donde toman sus valores. Como ejemplo, las restricciones de no negatividad son las siguientes:

$$x_j \geq 0; \quad j = 1; 2; \dots; n$$

Los modelos de programación lineal son los más usados dentro de la programación matemática y abarcan cualquier tipo de actividad humana como micro y macroeconomía, finanzas, marketing, economía de la energía, organización de la producción, planificación de la operación, selección de procesos, asignación de tareas, ingeniería química, forestal, agrónoma, comercio internacional, desarrollo económico y muchos otros más. Uno de los casos de aplicación con gran impacto ocurrió en la empresa norteamericana Swift & Company cuyo rubro es venta de carne de res y productos generados. Se aplicó modelos de programación lineal para cumplir

los requerimientos y generó un ahorro de 12 millones de dólares para el primer año (Hillier & Lieberman, 2010).

1.2.2. Programación entera y programación lineal mixta

Según Winston (2005) un problema de programación entera requiere que todas las variables tienen que ser enteros (p. 475).

En la formulación de muchos problemas las variables de decisión solo tienen sentido cuando son valores enteros. Existen múltiples aplicaciones de modelos de programación entera como por ejemplo la toma de decisiones para la asignación de actividades a cantidades enteras como personas, máquinas o vehículos.

Además de estas aplicaciones, un uso importante de valores enteros es la formulación que requiere decisiones tipo sí o no. Debido a que se presenta solo dos posibilidades, este tipo de decisiones se puede representar por los valores de 0 o 1. Las variables de este tipo son llamadas variables binarias (Hillier & Lieberman, 2010). La estructura de la formulación es de siguiente forma:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{si la decisión } j \text{ es sí} \\ 0, & \text{si la decisión } j \text{ es no} \end{cases}; \quad j = 1; 2; \dots; n$$

La programación lineal mixta (PEM) se refiere a la utilización de herramientas de solución de modelos lineales con la utilización de algunas variables enteras (Winston, 2005).

La aplicación de la PEM es variada ya que abarca problemas con variables que sean necesariamente número enteros. Por ejemplo, los problemas de manufactura con unidades de fabricación, problemas de transporte, redes de distribución y optimización, problemas de secuenciación, problemas de logística, entre otros.

Una aplicación importante de la PEM se da en la logística humanitaria cuyo alcance abarca los procesos y sistemas involucrados en movilizar personas, recursos, habilidades y conocimiento con el fin de ayudar en las actividades complejas de la ayuda humanitaria. Tanto la efectividad como la velocidad de respuesta de la ayuda humanitaria dependen fundamentalmente de la logística; para ello, se deben tomar decisiones y acciones administrativas antes, durante y después del desastre (Cornejo, Vargas, Aragón & Serpa, 2013; Serpa, 2014).

Las decisiones que se pueden tomar para este tipo de casos son las siguientes:

- Ubicación de almacenes.
- Rutas de evacuación.

- Flujos de bienes de ayuda.
- Personas movilizadas.
- Distribución de la ayuda humanitaria.

1.2.3. Análisis de las soluciones de la programación lineal

Los modelos de programación lineal arrojan los valores óptimos que se debe emplear para satisfacer la función objetivo. Las técnicas de optimización de los modelos son realizadas por algoritmos de solución que, a lo largo del tiempo, fueron codificados en softwares debido a la potencia de cálculo de los ordenadores. Cuando se aplica estas herramientas, pueden obtenerse diferentes tipos de soluciones como se presenta en el gráfico 1.2 (Schrage, 1997).

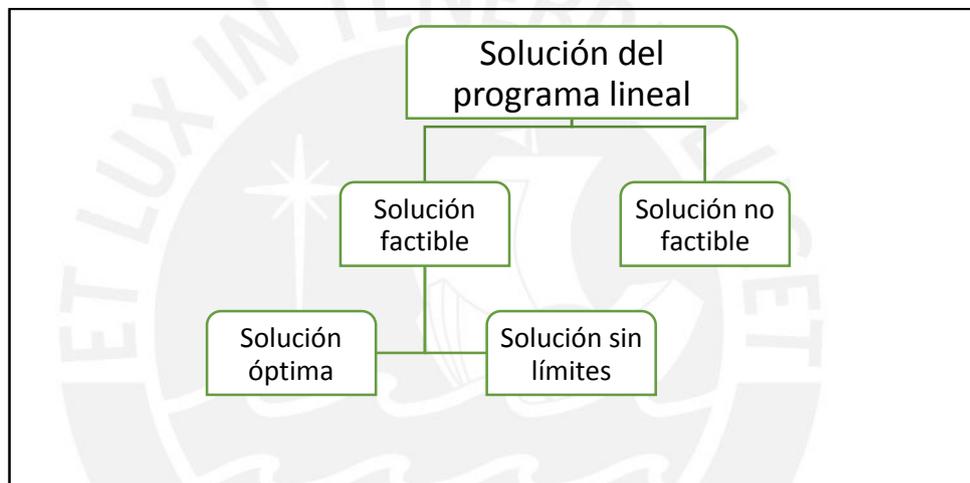


Gráfico 1.2. Tipos de soluciones en programación lineal
Fuente: Schrage (1997)
Elaboración propia

- **Solución factible**

Son aquellos valores de las variables de decisión que cumplen con todas las restricciones formuladas en el modelo de programación lineal, incluso las del rango de existencia. Aquellos valores que cumple estos requisitos se encuentran dentro de la región factible. Las soluciones factibles se pueden clasificar en dos tipos que son la solución óptima y la solución no acotada

- 1) La solución óptima es la solución básica (punto extremo) en la región factible que maximiza o minimiza la función objetivo, según como se declaró en el modelo. En algunos casos, hay más de una solución óptima que brinda el mismo resultado en la función objetivo y se denominan soluciones óptimas alternativas.

2) La solución no acotada se presenta cuando al menos una variable de decisión se incrementa indefinidamente. Generalmente, estos casos se presentan por errores en la formulación del modelo o por omisión de restricciones.

- **Solución no factible**

Esta solución no cumple con todas las restricciones del modelo.

La solución de los modelos brinda suficiente información para el análisis de los problemas. Los datos que se utilizan para construir los modelos de programación lineal deben ser confiables para lograr una solución próxima a la realidad. Para conocer cuál es el impacto en la solución cuando se cambia los valores de los parámetros, se utiliza el análisis de sensibilidad cuyos propósitos son conocer el comportamiento de cada variable cuando se efectúan cambios en los parámetros (Hillier & Lieberman, 2010) y determinar el impacto en la función objetivo.

1.3. Optimización multiobjetivo

El proceso de optimizar sistemáticamente y simultáneamente un conjunto de funciones objetivos es llamado optimización multiobjetivo (Marler & Arora, 2004).

1.3.1. Definición de un problema de optimización multiobjetivo

Según Marler & Arora (2004), un problema general de optimización multiobjetivo se define de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \min_x F(x) &= [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]^T \\ \text{sujeto a } g_j(x) &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \\ h_l(x) &= 0, \quad l = 1, 2, \dots, e, \end{aligned}$$

donde k es el número de funciones objetivo, m es el número de restricciones de desigualdad, y e es el número de restricciones de igualdad. Además, $x \in E^n$ es el vector de variables de decisión, donde n es el número de variables independientes x_i . $F(x) \in E^k$ es el vector de las funciones objetivo $F_i(x): E^n \rightarrow E^1$. Asimismo, x_i^* es el punto que minimiza la función objetivo $F_i(x)$.

La región factible de decisión X se define como el conjunto $\{x/g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m; \text{ y } h_l(x) = 0, l = 1, 2, \dots, e\}$. La región factible del criterio Z se define como el conjunto $\{F(x)/x \in X\}$

1.3.2. Conceptos básicos

Óptimo de Pareto

En la optimización multiobjetivo, usualmente no hay una solución global; sin embargo, es necesario determinar un conjunto de soluciones que juntos definen el óptimo. Las definiciones del óptimo de Pareto se detallan a continuación (Marler & Arora, 2004):

Definición 1. Óptimo de Pareto: un punto, $x^* \in X$, es óptimo de Pareto si no existe otro punto, $x \in X$, tal que $F(x) \leq F(x^*)$, y $F_i(x) < F_i(x^*)$ para al menos una función.

Definición 2. Óptimo Pareto débil: un punto, $x^* \in X$, es óptimo de Pareto débil si no existe otro punto, $x \in X$, tal que $F(x) < F(x^*)$.

En otras palabras, la definición 1 señala que un punto es un óptimo Pareto débil si no hay otro punto que mejora todas las funciones objetivo simultáneamente. Por otro lado, la definición 2 señala que un punto es óptimo de Pareto si no hay otro punto que mejora al menos una función objetivo sin detrimento de otra función. De ambos conceptos se infiere que los puntos óptimos de Pareto son óptimos débiles, pero los óptimos débiles no son óptimos de Pareto.

1.3.3. Métodos para hallar óptimos de Pareto

Debido a que en un programa de optimización multiobjetivo no hay una sola solución, existen métodos exactos que buscan el conjunto de soluciones óptimas de Pareto (Ehrgott & Gandibleux, 2003). A continuación, se presenta dos métodos empleados:

- **Método de suma de pesos:** es el método más popular pero no adecuado debido a la complejidad computacional que genera. En este método, las múltiples funciones objetivos se juntan en una sola, sumándose entre sí y resultando ser un problema de optimización con una sola función objetivo. El modelo es el siguiente:

$$\min_x \sum_{i=1}^k w_i F_i(x)$$

$$\text{sujeito a } g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad h_l(x) = 0, \quad l = 1, 2, \dots, e,$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1$$

$$w \geq 0, \quad x \in \Omega, \quad \Omega \in \mathbb{R}^n$$

- **Método de épsilon restricción:** la principal idea de este método es minimizar solo una de las funciones objetivos mientras que las demás funciones objetivos se anotan como restricciones en el modelo. El modelo es el siguiente:

$$\begin{aligned} & \min_x f_i(x) \\ \text{sujeto a } & g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad h_l(x) = 0, \quad l = 1, 2, \dots, e, \\ & \{f_j(x) \leq \epsilon_j, j = 1, \dots, m (j \neq i)\} \\ & x \in \Omega, \quad \Omega \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

1.4. Ayuda a las decisiones multicriterio

La ayuda a las decisiones multicriterio, más conocida por sus siglas MCDA (*Multicriteria decision aid* en inglés) es parte del campo de la Investigación de Operaciones y su objetivo es ayudar al tomador de decisiones a resolver situaciones de elección con múltiples criterios en consideración. Ha tenido un rápido desarrollo porque la motivación fue encontrar soluciones en el complejo mundo real de decisiones que muchas veces no pueden ser resueltas (Dourmpos & Zopounidis, 2002).

1.4.1. Metodologías del MCDA

Existen una amplia gama de metodologías para solucionar diferentes problemas de decisión multicriterio. Estas metodologías suelen clasificarse por la forma en el que desarrollan el algoritmo o modelo. Las metodologías más usadas, son aquellas que usan como fundamento las “Relaciones de Superación” (Ruiz, 2015).

Las “Relaciones de Superación” comparan las diversas alternativas por pares con base en dos medidas: la concordancia y la discordancia. La concordancia se refiere a aquellos pares de alternativas que superan a otro; la discordancia es el caso inverso, es decir un par de alternativas superado por otro. Los principales representantes de estas ideas son los métodos ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité* en francés), aunque posteriormente hacen su aparición los métodos PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations* en inglés) (Ruiz, 2015).

1.4.2. Método ELECTRE

Es un modelo de decisión multicriterio que muestra un grado de dominancia de una alternativa respecto a través de una serie de procedimientos. Utiliza ponderaciones iniciales a los criterios de decisión asignando pesos específicos. Luego, se realizan comparaciones de alternativas según la “dominancia” o “superación” de una

alternativa respecto de otra. El resultado obtenido es el ordenamiento del conjunto de alternativas (Ruiz, 2015).

1.4.3. Análisis de concordancia

Para el método ELECTRE, Ruiz (2015) explica que las alternativas se comparan por pares y tomando en cuenta los criterios de decisión seleccionados para establecer el grado de dominancia de una alternativa sobre otra. Asimismo, se confirma o contradice la relación de dominancia binaria entre las opciones de decisión, con los pesos que el tomador de decisión asigna a cada criterio.

1.4.4. Algoritmo ELECTRE I

García & Muñoz (2009) señalan que el método ELECTRE I define umbrales de concordancia y discordancia para la aceptación de la relación de superación entre alternativas.

Así, la concordancia entre dos alternativas se define de la siguiente manera (Figueira, Mousseau & Roy, 2016):

$$C_{a/b} = \sum_{\{j: g_j(a) \geq g_j(b)\}} w_j$$

donde:

$C_{a/b}$: es la concordancia de la alternativa a con respecto a la alternativa a , es decir, a es al menos tan bueno como b .

w_j : es el valor del peso del criterio j .

$g_j(a)$: es la calificación de la alternativa a en el criterio j .

$g_j(b)$: es la calificación de la alternativa b en el criterio j .

La discordancia se define como:

$$D_{a/b} = \max_{\{j: g_j(a) < g_j(b)\}} \{g_j(b) - g_j(a)\}$$

donde:

$D_{a/b}$: es la discordancia de la alternativa a con respecto a la alternativa b .

$g_j(a)$: es la calificación de la alternativa a en el criterio j .

$g_j(b)$: es la calificación de la alternativa b en el criterio j .

Las etapas que involucra el método ELECTRE I son las siguientes (Jaimes, Sandoval & Torres, 1992):

1. Defina las matrices de concordancia y discordancia con $C_{a/b}$ y $D_{a/b}$.
2. Defina el valor de p con base en la matriz de concordancia y defina el valor de q con base en la matriz de discordancia.
3. Compare el valor de p con la concordancia de cada opción para determinar las opciones que quizá dominan la alternativa en estudio. Si se cumple la condición $C_{a/b} \geq p$, entonces la alternativa elegida tal vez domine al resto de alternativas.
4. Determine las opciones que realmente dominan a la alternativa escogida comparando las alternativas encontradas en el paso 3 y las que no cumplen con $D_{a/b} \leq q$ se eliminan.
5. Compare por columnas las alternativas. Si se cumple la condición $C_{a/b} \geq p$, entonces la alternativa elegida tal vez sea dominada por el resto de alternativas.
6. Determine las opciones que realmente son dominadas por la alternativa escogida comparando las alternativas encontradas en el paso 5 y las que no cumplen con $D_{a/b} \leq q$ se eliminan.
7. Elabore una tabla que muestre todas las alternativas, las que dominan y las que son dominadas.
8. Con la tabla del paso 7 se prepara la jerarquía. La alternativa que no es dominada por otras opciones se ubica en primer lugar.
9. Se elimina de la tabla la alternativa no dominada del paso 8. Luego se efectúa nuevamente el paso 8 hasta obtener todas las alternativas jerarquizadas.

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Este capítulo presenta conceptos sobre las inundaciones, su clasificación y una exposición de la problemática de estos desastres naturales en el territorio peruano a través de una reseña de sus causas e impactos. Asimismo, se presenta una breve descripción de cómo es la gestión de los desastres en el Perú y en particular las características de los albergues de acuerdo con el INDECI.

2.1. Concepto y clasificación de la inundación

2.1.1. Evidencias de las inundaciones como desastre natural

En términos agregados, la frecuencia de los desastres naturales en el mundo se ha incrementado por lo menos desde el año 1964 como ilustra el gráfico 2.1. Asimismo, sus impactos también son creciente tanto en cantidad de víctimas como en costos directos como se observa en el gráfico 2.2.

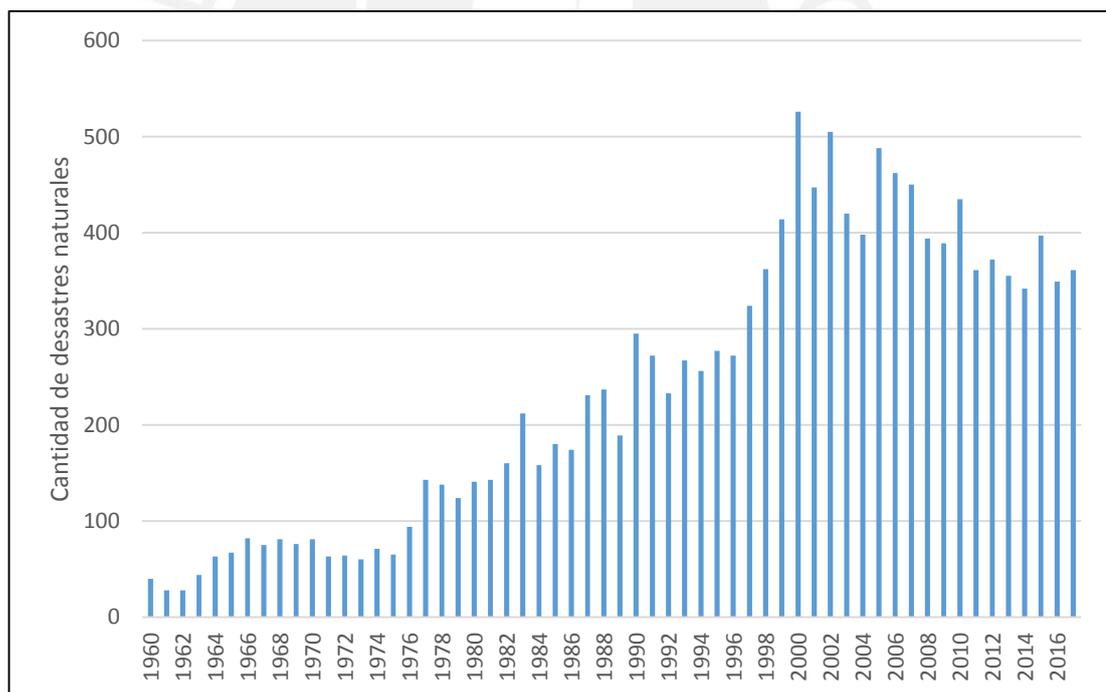


Gráfico 2.1. Frecuencia de desastres naturales en el mundo
Elaboración propia
Fuente: CRED & UCL (2018)

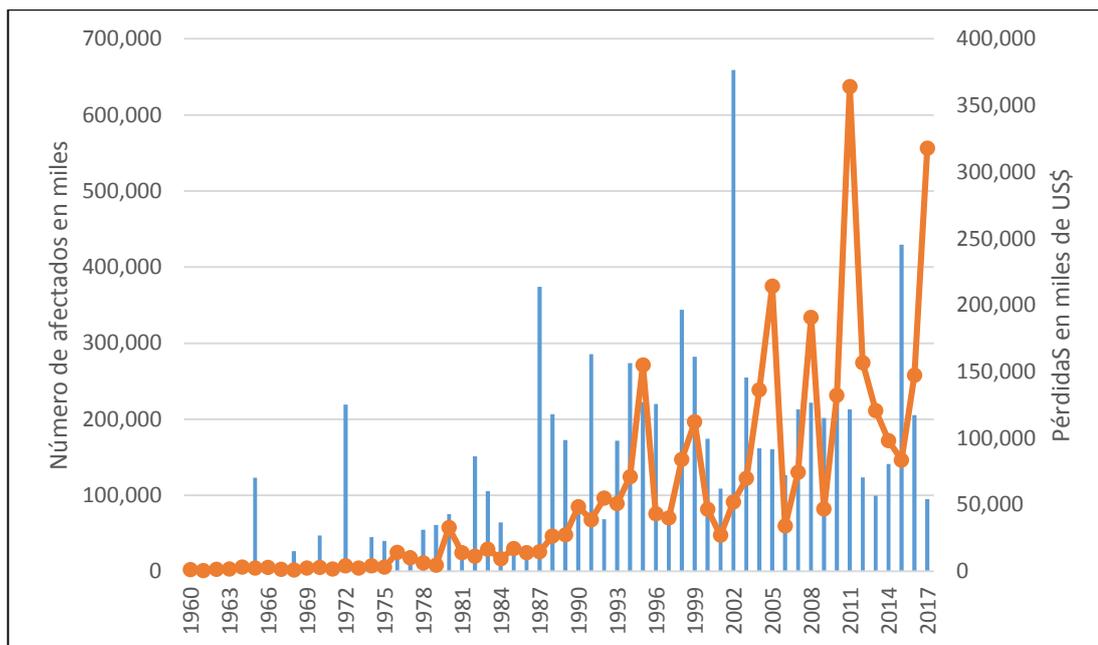


Gráfico 2.2. Total de afectados y pérdidas económicas por desastres naturales
 Elaboración Propia
 Fuente: CRED & UCL (2018)

Con respecto a las inundaciones en particular, diversas evidencias señalan que son desastres naturales de elevada frecuencia e impacto. Al respecto, la Directora del Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED)¹, Dubarati Guha Sapir, señala que “Los desastres naturales que más aumentan en Europa son las inundaciones” (Larrañeta, 13 de octubre de 2015). En la misma línea, el Banco Mundial refiere que la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR) afirma para Argentina que “el 39% de los desastres que se registran en el país son inundaciones, convirtiéndolo en el evento que más afecta a las personas y patrimonio en Argentina”, también señala que “desde hace 30 años la zona del litoral argentino registró cinco de las peores 10 crecidas del siglo 20” (Banco Mundial, 1 de octubre de 2014). Por otro lado, en el año 2007 el estado de Tabasco en México sufrió una inundación que anegó el 62% de su superficie (Perevochtchikova & Lezama de la Torre, 2010). En término globales para América Latina, el gráfico 2.3 muestra que las inundaciones se incrementaron en los últimos 30 años.

¹ The Center for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED) promueve la investigación, entrenamiento y conocimientos en emergencias humanitarias, particularmente en salud pública y epidemiología.

Finalmente, las evidencias mostradas sugieren que las inundaciones son desastres naturales con elevada frecuencia, y también en términos relativos, de elevados impactos tanto en víctimas como en costos directos.

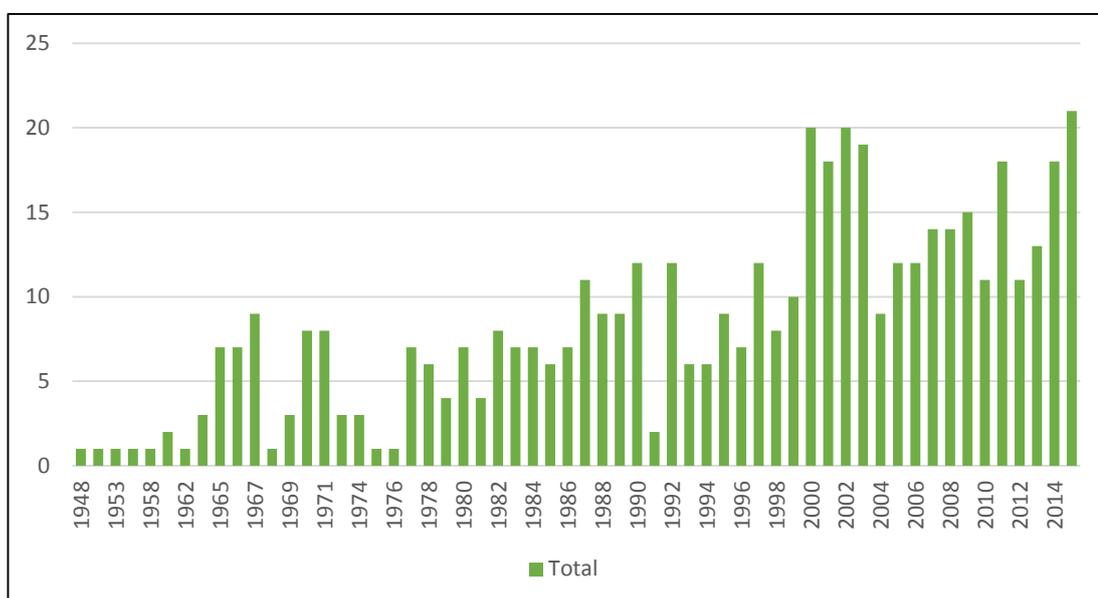


Gráfico 2.3. Frecuencia de inundaciones en América Latina
Elaboración propia

Fuente: Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar)² (2016)

2.1.2. Concepto de inundación

El término inundación tiene diversas definiciones. La Real Academia Española (RAE) indica que es la acción de cubrir el agua en determinado lugar. Asimismo, el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) (2018) del Perú indica que “es el desborde lateral de las aguas de los ríos, lagos y mares que cubre temporalmente los terrenos bajos adyacentes”. Mientras que *The Queensland Government* (2011) precisa que en una inundación el agua cubre un área por lo general seca. Por otro lado, el Banco Mundial (2011) señala que las inundaciones son un fenómeno global que pueden causar devastación generalizada, daños económicos y pérdida de vidas. Como se puede apreciar, las tres primeras referencias inciden en la excesiva presencia de agua en áreas, mientras que la última describe a la inundación como un fenómeno global con capacidad de provocar impactos de naturaleza socioeconómica.

2.1.3. Clasificación de las inundaciones

Según la clasificación general del CRED, las inundaciones son desastres naturales de tipo hidrológico (CRED, 2018b). Una clasificación según su duración y origen la

² DesInventar es una herramienta conceptual y metodológica para la construcción de bases de datos de pérdidas, daños o efectos ocasionados por emergencias o desastres.

presenta el Manual Técnico de Estimación de Riesgos ante Inundaciones Fluviales (INDECI, 2011) que a continuación se expone.

Según su duración

a) Inundaciones dinámicas o rápidas

Son aquellas que suceden muy rápido como consecuencia de lluvias intensas que caen sobre una superficie pequeña con fuerte pendiente (INDECI, 2011). Asimismo, *The Queensland Government* (2011) señala que las lluvias intensas pueden ocurrir repentinamente, luego de minutos u horas después de la lluvia se generan inundaciones que crecen rápidamente.

b) Inundaciones estáticas o lentas

Por lo general, ocurren cuando las lluvias son persistentes y generalizadas, lo que provoca un aumento del caudal del río hasta superar la capacidad de su cauce y se desborda e inunda áreas cercanas (INDECI, 2011). Según *The Queensland Government* (2011) las inundaciones lentas cubren de agua grandes áreas de tierra durante días, semanas o meses; como es el caso de las áreas inundadas por las lluvias torrenciales causadas por el fenómeno El Niño en el norte del Perú. Asimismo, un caso resaltante de grandes embalses temporales es la laguna de La Niña que se forma en la depresión de Sechura ubicada en el área desértica de Piura por causa de las lluvias intensas del fenómeno El Niño, como por ejemplo el del año 1998, que según Escudero (s.f.) cubrió de agua 2,326 km² pero que en noviembre de 1999 ya había perdido el 83.71% de su superficie.

Según su origen

a) Inundaciones pluviales

Se produce por la acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica y no necesariamente provoca el desbordamiento de un cauce fluvial (INDECI, 2011).

b) Inundaciones fluviales

El INDECI (2011) señala que las inundaciones fluviales son consecuencia del desborde de los ríos y arroyos por aumento del volumen de agua. Asimismo, la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) (s.f.) señala que en las inundaciones fluviales los ríos se inundan con agua y se desbordan en sus orillas.

c) Inundaciones por operaciones incorrectas de obras de infraestructura hidráulica o rotura

Es causada por la rotura o colapso de las infraestructuras hidráulicas (INDECI, 2011). Asimismo, la Presidencia de la República de México (2013) señala que es producto de la operación incorrecta de abrir las compuertas de una represa más de lo previsto que causa la salida de una cantidad de agua que supera la capacidad del cauce de los ríos lo que provoca la inundación de los terrenos.

2.2. Inundaciones en el Perú

Según el Centro de Estudios y Prevención de Desastres ([PREDES], 2009), el Perú sufre cuatro fenómenos naturales que ocasionan los mayores desastres: los terremotos, las inundaciones, los huaycos y las sequías. Esta investigación se enfoca en las inundaciones y sus implicancias en el territorio peruano. En las secciones siguientes se expone para el Perú, el registro de inundaciones y una reseña de sus principales causas e impactos.

2.2.1. Registro de inundaciones

El gráfico 2.4 ilustra la frecuencia de inundaciones ocurridas en el Perú desde el año 1975 hasta el 2013. La mayor cantidad de estos eventos ocurrió en los años 1981, 1983, 1994 y 1998, alcanzando un pico de 279 inundaciones en 1994. Asimismo, en el gráfico se resalta en las zonas sombreadas los picos que coinciden con periodos cuando ocurrió el fenómeno El Niño.

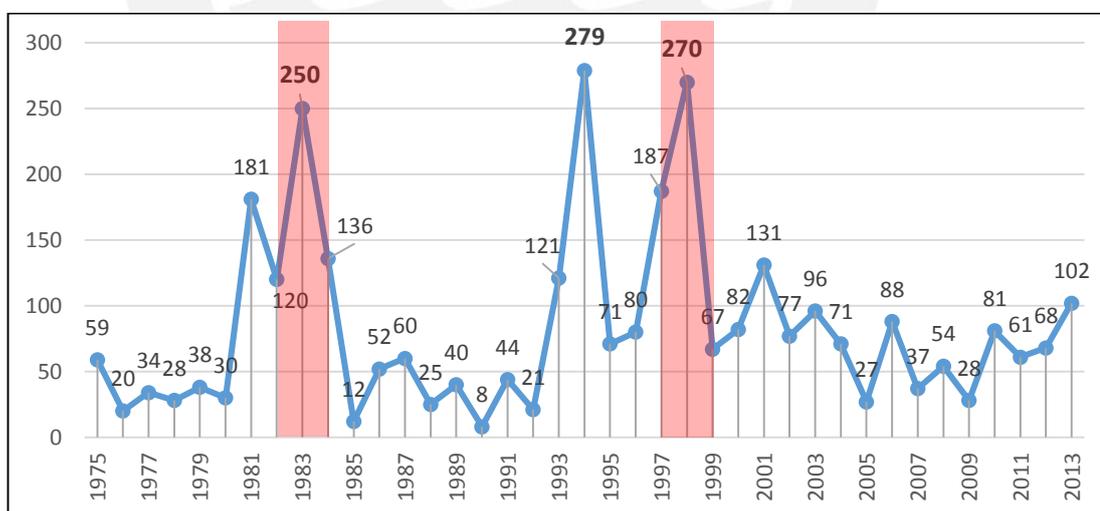


Gráfico 2.4. Frecuencia de inundaciones en el Perú

Elaboración propia

Fuente: DesInventar (2016)

2.2.2. Causas de inundaciones en el Perú

Las inundaciones dentro del territorio peruano se producen generalmente por lluvias intensas, desbordamientos de ríos, y maremotos. Debido a la complejidad geográfica

del Perú, las principales causas de las inundaciones se diferencian en las regiones costa, sierra y selva (ANA, s.f.).

En la costa, las inundaciones ocurren debido a la estacionalidad de las precipitaciones en la región andina. Esto provoca que el caudal de los ríos que bajan de la región andina, incrementen el flujo de agua de los ríos en la costa, y luego se desbordan y ocasionan daños a menudo en las regiones del norte del Perú: Tumbes, Piura, y Lambayeque. Inundaciones con esas características también han ocurrido en Lima por los desbordes de los ríos Chillón y Rímac. También, inundaciones de gran magnitud han ocurrido en Ica y Pisco en el sur del Perú (ANA, s.f.).

Por otro lado, el fenómeno El Niño aumenta la temperatura de la superficie del Océano Pacífico y origina fuertes lluvias. Cuando el fenómeno es severo, las lluvias torrenciales desencadenan inundaciones que devastan las zonas más vulnerables de los departamentos de Piura y Tumbes ubicados en la costa norte del Perú. Una información relevante de El Niño como desencadenante de inundaciones la brinda el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) quien afirma que los fenómenos relacionados con el Niño “presentan una mayor frecuencia, persistencia e intensidad durante los últimos 20–30 años en comparación con los 100 años anteriores” (2002, p. 10). De esa afirmación se puede inferir que este fenómeno seguirá siendo una causa importante, y quizá la mayor, de las inundaciones en el futuro, y en particular en el Perú.

En la zona andina, específicamente en la vertiente del Titicaca, las inundaciones ocurren mayormente por los desbordes de los ríos Coata y Ramis debido a las lluvias intensas. Asimismo, el inadecuado drenaje de las áreas urbanas causa el colapso de las ciudades, a menudo las más afectadas son Puno y Juliaca en los meses de verano (coincide con la época de lluvia) y se acentúa con la presencia del fenómeno El Niño (ANA, s.f.).

En zonas de la selva, el agua de lluvia desde que se precipita sobre la tierra sufre los procesos de filtración, acumulación subterránea, drenaje, retención, evaporación y consumo (Prevención de Desastres en la Comunidad Andina [PREDECAN], 2006). Estas inundaciones afectan principalmente a los departamentos de Amazonas, Junín, Loreto y Ucayali (ANA, s.f.).

En resumen, las causas expuestas para las tres regiones del Perú se caracterizan por ser principalmente de origen natural. Al respecto, el gráfico 2.5 muestra las principales causas de las inundaciones ocurridas en el Perú desde el año 1975 hasta el 2013.

Según el gráfico 2.5, hay cinco grandes factores que provocan las inundaciones en el Perú. La principal causa con 37% de las veces es que las inundaciones son del tipo pluvial producto de las lluvias torrenciales provocadas por variaciones climáticas. La segunda con 26% es debido a los desbordamientos de los ríos que dan origen a las inundaciones fluviales. En tercer lugar, tanto los maremotos como el fenómeno El Niño registran un 11% de las veces.

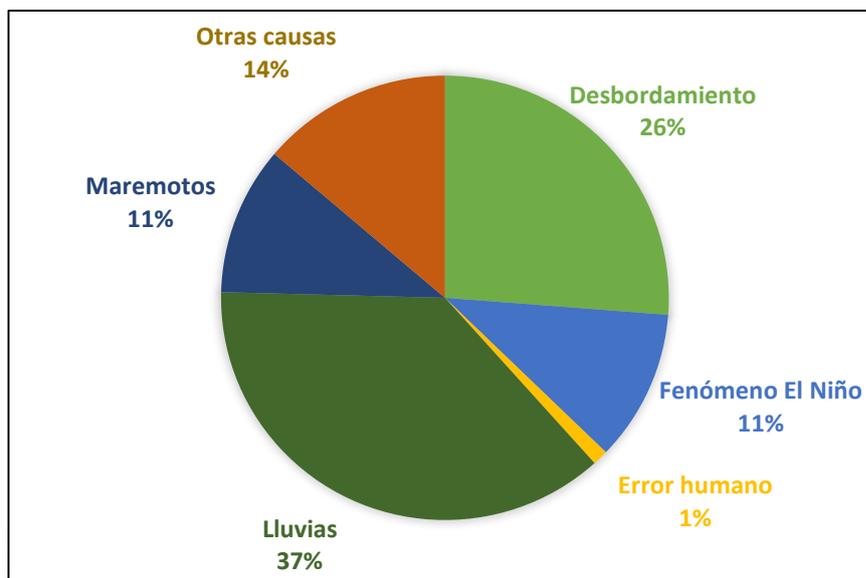


Gráfico 2.5. Principales causas de las inundaciones
Elaboración propia
Fuente: DesInventar (2016)

La última causa menos frecuente con 1% es de origen antrópico. Si bien este porcentaje es relativamente bajo en el Perú, no debe ser motivo para considerarla como de reducido impacto. Algunos casos lamentables con severas consecuencias y que combinan factores causales naturales y antrópicos son los siguientes: el error humano en la operación de la represa Vajont en Italia que en 1963 según Bosa & Petti (2012, p. 1763) provocó 1,900 muertos. También, la rotura de una represa en Pakistán que barrió cinco aldeas (*International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies [IFRC], 2005*). De lo anterior se infiere que el Perú no está exento de sufrir un desastre de magnitud considerable por la rotura de una de sus represas.

Es importante explorar aún más sobre las causas de las inundaciones. Aparentemente, los eventos naturales como las lluvias y maremotos como causantes de las inundaciones son de naturaleza exógena, dicho de otro modo de origen natural. En el caso del fenómeno El Niño, a partir de la definición de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (s.f) se concluye que su origen es predominantemente natural; sin embargo, en el caso de los desbordamientos podría haber también un componente antrópico cuando el rebalse del río se acelera porque

sus cauces están colmatados por residuos sólidos generados por el ser humano, es decir una causa antrópica. Esta situación ocurre a menudo en los ríos del Perú, y en particular en los ríos de la costa en la estación de verano.

Sobre las causas antrópicas, el informe “Cambio Climático 2014” señala lo siguiente “El IPCC está hoy seguro con un 95% de certeza de que la actividad humana es actualmente la causa principal del calentamiento global.” (IPCC, 2014, p. 5). También, el mismo informe indica con alto nivel de confianza que en las zonas urbanas las proyecciones señalan un riesgo derivado de precipitaciones extremas, inundaciones continentales y costeras, así como la elevación del nivel del mar (p. 74). A partir de las afirmaciones del IPCC se puede inferir que un gran porcentaje del cambio climático es de causa antrópica, y si la alteración del clima ya revela ser el desencadenante de varias de las inundaciones, entonces estas también tienen una causa antrópica en las actividades económicas que el ser humano realiza.

Sin embargo, las causas antrópicas de las inundaciones no solo provienen de la colmatación de las cuencas de los ríos con residuos sólidos o del cambio climático. Un aspecto importante (expuesto en el capítulo 1) es la vulnerabilidad social, en infraestructura, la organización social de la población o su nivel de desarrollo humano. Tal como indica Salas (2007) la inadecuada gestión de los riesgos en una zona en donde existen fenómenos naturales pone en riesgo la vida humana. Un ejemplo claro de vulnerabilidad social sucedió en el norte del Perú el año 2017 en donde hubo 90 muertos y 742,000 afectados por las inundaciones provocadas cambio climático producido por el fenómeno del Niño. Algunos afectados vivían en zonas de alto riesgo por lo que se recomendó trabajar en políticas para que las personas vivan en lugares más seguros (Tola, R., 2017).

En resumen, es importante resaltar que una apropiada interpretación del gráfico 2.3 debe contemplar la combinación de factores naturales y antrópicos en varias de las cinco causas ilustradas (quizá la excepción sea el maremoto por su aparente origen puramente natural). Asimismo, que las evidencias del IPCC señalan con claridad la presencia de inundaciones de gran magnitud producto del cambio climático y que para este fenómeno, el IPCC afirma con mucha certeza que con elevado porcentaje proviene de la actividad humana.

Por otro lado, los maremotos o tsunamis se consideran como una de las causas de inundaciones porque a su vez son provocados por sismos marinos que generan olas que cubren con agua las zonas costeras. La vulnerabilidad y exposición de la costa Lima a probables tsunamis se aborda en la sección 2.3.

2.2.3. Impactos de las inundaciones en el Perú

Existen diferentes impactos luego de que una inundación ocurra y usualmente se miden en pérdidas de vidas humanas, damnificados y costos económicos directos.

Según el glosario de DesInventar (2009), las personas afectadas son todas aquellas que sufren los efectos indirectos o secundarios a un desastre, mientras que los damnificados son todas las personas que sufrieron daño directo de los desastres que puede ser la pérdida total o parcial de sus viviendas, cultivos y bienes materiales. La cantidad de personas afectadas y damnificadas debido a las inundaciones en el Perú se presenta en el gráfico 2.6 cuyos valores utilizan una escala de color: las celdas de tonalidad verde muestran los valores más bajos y las celdas de tonalidad roja indican mayor cantidad.

Año	Afectados	Damnificados	Año	Afectados	Damnificados
1975	0	10,166	1995	22,959	9,313
1976	198	0	1996	2,440	36,425
1977	0	2,645	1997	41,947	82,136
1978	18	1,676	1998	19,644	309,374
1979	21,736	465	1999	56,075	32,530
1980	13,010	1,200	2000	4,346	9,395
1981	30,664	13,240	2001	9,233	30,871
1982	7,499	14,153	2002	495	7,022
1983	30,694	40,219	2003	638	2,236
1984	32,000	23,005	2004	1,359	9,136
1985	0	300	2005	0	330
1986	4	25,315	2006	8,084	3,230
1987	892	5,060	2007	34,260	2,470
1988	5,027	505	2008	36,843	2,230
1989	33,700	2,680	2009	72,075	500
1990	0	1,610	2010	86,300	120
1991	30,000	760	2011	5,833	2,370
1992	0	8,127	2012	118,716	14,209
1993	300	311,946	2013	110,937	117,405
1994	98,211	463,686	TOTAL	936,137	1,598,060

Gráfico 2.6. Cantidad de personas afectadas y damnificadas por inundación
Elaboración propia
Fuente: DesInventar (2016)

El gráfico 2.6 muestra que en el año 2012 ocurrió la mayor cantidad de afectados, cifra que corresponde a las inundaciones que sufrió el departamento de Loreto que según el Gobierno Regional de Loreto et al., (s.f.) representa el 14% de la población. Asimismo, la misma referencia señala que el nivel de damnificados representa el 23% de la población.

En el caso de las personas damnificadas, los años con mayor cantidad son 1994, 1998 y 2013. Estas fueron provocadas por el desborde de los ríos Rímac, Cañete y Ucayali en el año 1994 (INDECI, 2014a); por los efectos del fenómeno de El Niño en el año 1998 que dejó 90,220 viviendas damnificadas en las localidades de Piura,

Tumbes, Lambayeque y La Libertad (Machuca, 2014), y por el desbordamiento del Río Huallaga en el año 2013 que dejó cerca de 22,000 familias damnificadas (Perú 21, 2013).

Con respecto a las pérdidas materiales, las inundaciones destruyen cultivos, así como viviendas, centros educativos y centros de salud, entre otros. El gráfico 2.7 muestra las viviendas destruidas y los cultivos perdidos desde el año 1975 hasta el 2013. En el año 1993, ocurrió el mayor número de cultivos perdidos del periodo cuya superficie fue 297,485 hectáreas. Además, en el año 1998 se observa un pico de 10,501 casas destruidas, asimismo, en ese año ocurrió el fenómeno El Niño.

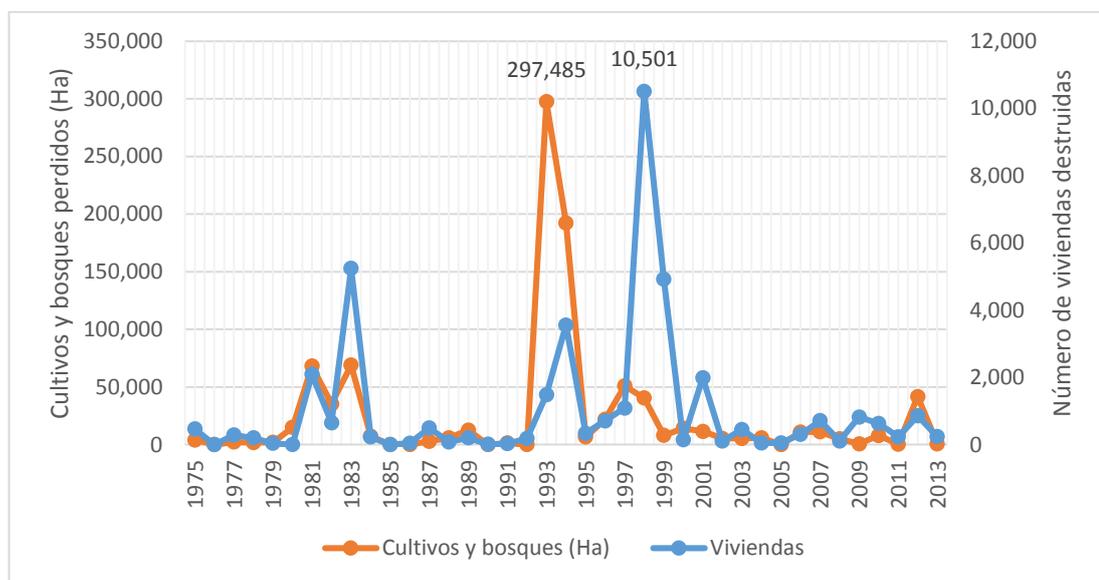


Gráfico 2.7. Cantidad de viviendas destruidas y cultivos perdidos en hectáreas por inundaciones en el Perú
Elaboración propia
Fuente: DesInventar (2016)

Finalmente, las pérdidas económicas provocadas por las inundaciones se estiman en 6,352 millones de soles entre los años 1970 al 2013 (DesInventar, 2016).

2.3. Zonas vulnerables por inundaciones en el Perú

El grado de vulnerabilidad es bastante influenciado al grado de pobreza de la sociedad que sufre el impacto de un peligro potencial. La vulnerabilidad física estructural y la vulnerabilidad por exposición son mayores para las comunidades más pobres (Sistema Nacional De Defensa Civil [SINADECI], 2004, p. 151).

La Comunidad Andina (2009) realizó la estimación de riesgos por inundación para los países andinos. En ese estudio, presentó los datos en mapas donde se puede localizar las zonas vulnerables, uno de esos mapas para el Perú se ilustra en el gráfico 2.8.

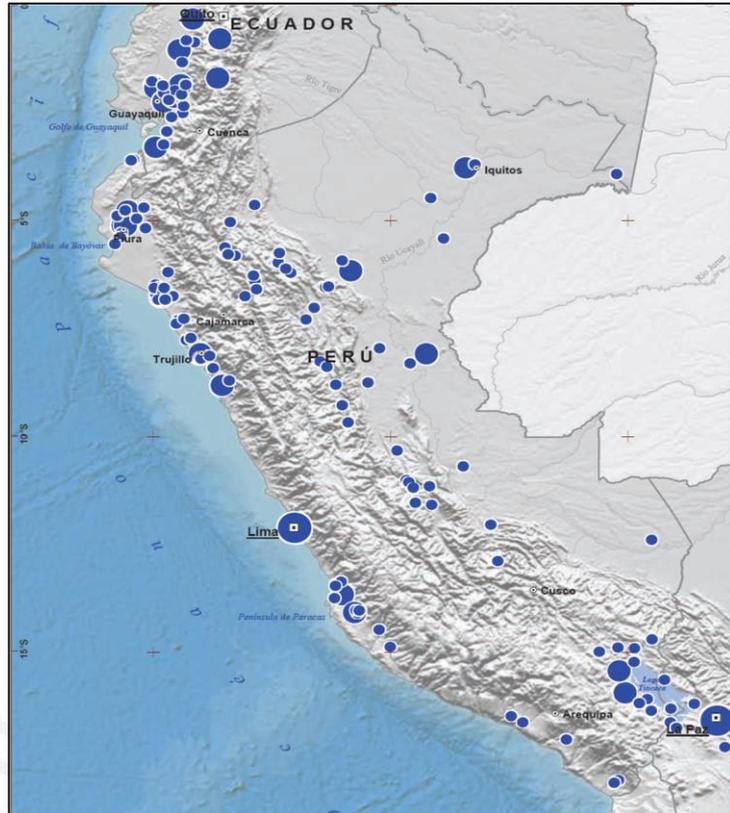


Gráfico 2.8. Procesamiento cartográfico y de SIG
Fuente: Comunidad Andina (2009)

El mapa del gráfico 2.8 presenta las zonas que están expuestas a inundaciones en el Perú y concentra una población de aproximadamente 5.4 millones de personas. En otras palabras, el 20% de la población peruana está expuesta al riesgo de sufrir daños a causa de las inundaciones (Comunidad Andina, 2009). Los puntos que se muestran en la gráfica tienen diferentes tamaños que representan la cantidad de personas expuestas y es proporcional el tamaño del diámetro de los puntos.

Además, el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres del Perú ([SINAGERD], 2014) realizó el análisis de las personas que están expuestas a fenómenos hidrometeorológicos (incluye lluvias intensas, huaycos, inundaciones, deslizamientos) por cada departamento. El gráfico 2.9 indica que los departamentos con mayor número de personas expuestas son los departamentos de Piura en primer lugar alcanzando hasta 1,155,967 personas, luego le siguen los departamentos de Loreto y Cusco.

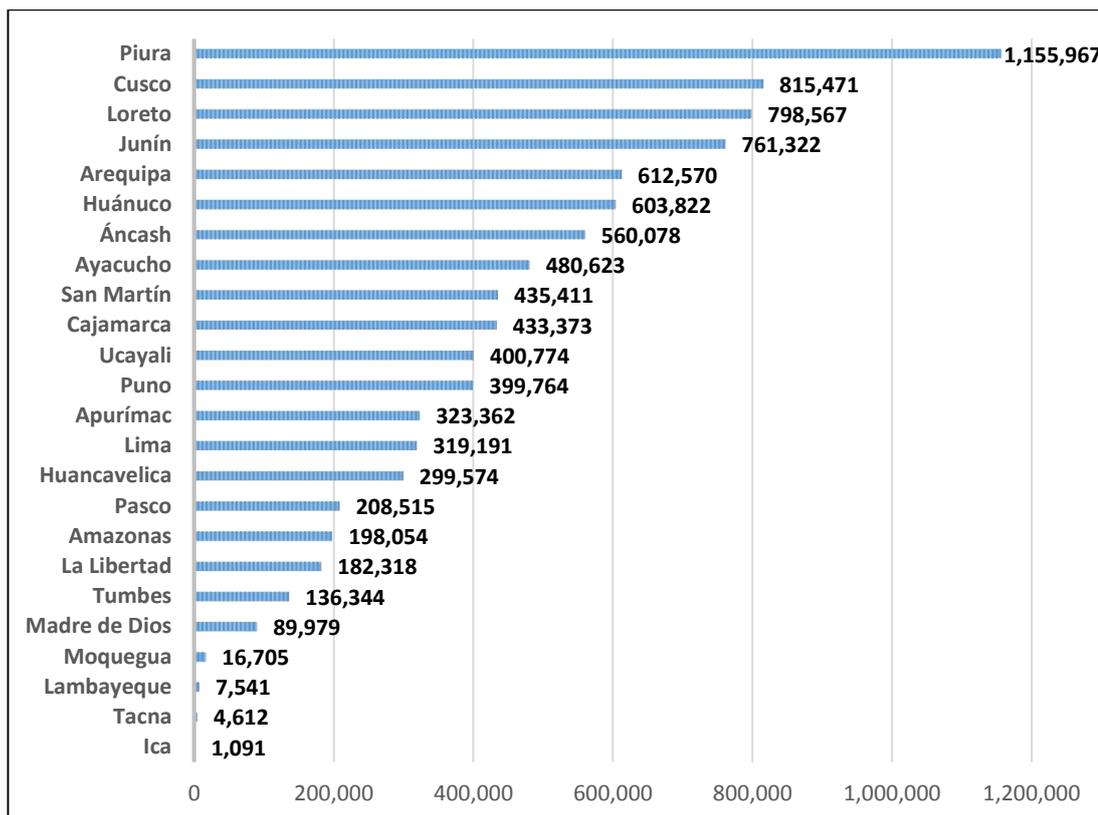


Gráfico 2.9. Cantidad de personas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos asociados a lluvias intensas por departamentos del Perú
Fuente: Tomado y adaptado del SINAGERD (2014)

La vulnerabilidad del país frente a maremotos o tsunamis tiene como variables críticas a la ubicación de los asentamientos en regiones costeras bajas, la falta de construcciones resistentes a sismos y maremotos, falta de sistemas de aviso y planes de evacuación oportuna y falta de preocupación de la población del peligro de un tsunami (SINADECI, 2004, p. 155). La población expuesta ante un tsunami en el Perú se concentra en todo el litoral debido al gran número de puertos y ciudades. Por las condiciones mencionadas, las principales ciudades costeras y puertos más vulnerables son: Lima-Callao, Huacho, Pisco, Chincha, Camaná, Islay, Ilo, Chimbote, Trujillo, Zorritos, Barranca, Chancay, Cerro Azul, Talara, Bayovar, Mollendo, Paita, Melchorita. La mayor exposición se encuentra en el Callao debido a la gran cantidad de personas que viven cerca de las zonas de inundación (SINAGERD, 2014). Además, Lima Metropolitana tiene más de 80 kilómetro de costa habitada desde Ancón hasta Lurín, la cual la hace muy vulnerable en caso de un tsunami (PREDES, 2009, p. 18).

Por su ubicación geográfica, Lima Metropolitana y Callao se ha visto atacada por una gran cantidad de sismos de gran intensidad y muchos de ellos han generado la ocurrencia de tsunamis. El Callao fue afectado por tsunamis en 1586, 1687 y 1746,

produciendo éste último pérdidas catastróficas que acabó con más de 6,000 personas, siendo el Callao el distrito más afectado ya que perdió el 96% de su población (PREDES, 2009).

A modo de comparación, en Chile ocurrió un terremoto de 8.8 Mw en el año 2010. Seguido de este terremoto, hubo un devastador tsunami (la altura de ola llegó hasta 25 metros) que impactó en la costa chilena dejando en total 2,671,556 personas afectadas y daños económicos de hasta 30,000 millones de dólares. Sin embargo, se estima que murieron 150 personas a causa del tsunami, cifra relativamente baja considerando la magnitud del evento. El terremoto alertó a la población para que pudieran evacuar y así evitar el devastador efecto del maremoto (Kahmis & Osorio, 2012).

Un sismo probable en Lima Metropolitana (8.0 Mw a 70 km de La Punta) dejaría 51,019 fallecidos (PREDES, 2009) debido a la configuración estructural de las viviendas, materiales de construcción, estado de conservación de vivienda y altura de viviendas. Esta comparación muestra una alta vulnerabilidad de Lima y Callao en comparación con Chile ya que la cantidad de muertos que hubo en Chile en el terremoto del 2010 fue de tan solo 580 personas (Kahmis & Osorio, 2012)

La evidencia hasta aquí expuesta, revela un panorama de vulnerabilidad que presenta Lima y Callao. La cantidad de personas, ubicación geográfica y las condiciones estructurales hacen de Lima y Callao uno de los lugares más vulnerables del Perú ante tsunamis o maremotos.

2.4. Gestión del riesgo de desastres en el Perú

En el Perú, el SINAGERD fue decretado mediante la Ley N° 29664 y sus organismos públicos ejecutores son el INDECI y el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED).

La Ley N° 29664 establece la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, definiéndola como el conjunto de orientaciones dirigidas a impedir o reducir los riesgos de desastres, evitar la generación de nuevos riesgos y efectuar una adecuada preparación, respuesta, rehabilitación y reconstrucción ante situaciones de desastre, así como a minimizar sus efectos adversos sobre la población, la economía y el ambiente. (INDECI, 2012, p. 92)

A continuación se presenta los componentes del SINAGERD (más detalle en la Ley 29664).

1) Gestión prospectiva

Es el conjunto de actividades y acciones que se realizan a fin de prevenir y evitar la aparición de futuros riesgos.

2) Gestión correctiva

Es la gestión para corregir o mitigar el riesgo existente y pretende transformar las condiciones sociales de vida en beneficio de la sostenibilidad.

3) Gestión reactiva

Es el conjunto de acciones y medidas destinadas a enfrentar los desastres. La implementación se logra mediante el planeamiento, la organización, dirección y control de las actividades y acciones vinculadas a los procesos de reparación, respuesta y rehabilitación.

2.4.1. Procesos de la gestión reactiva

Los procesos de la gestión reactiva se encargan de elaborar un plan estructurado que ayude a enfrentar los desastres. Los procesos y subprocesos son los siguientes:

2.4.1.1. Proceso de preparación

Las acciones que se ejecutan en el proceso de preparación abarcan los siguientes subprocesos (INDECI, s.f.).

A. Información sobre escenarios de riesgo de desastres

Su finalidad es describir el escenario teniendo en cuenta la vulnerabilidad existente de la zona analizada. La descripción abarca los tipos de daños y pérdidas que pueden generarse producto del desastre. (INDECI, s.f.). Por otro lado, la información que se requiere para la preparación de la población ante las emergencias y desastres es la siguiente: bases de datos de las emergencias, de desastres ocurridos y de estudios de suelos; estudios de simulación y mapas de riesgo (INDECI, 2014b, p. 15).

B. Planeamiento

Su objetivo es crear una capacidad permanente para responder ante situaciones de desastres. Abarca los siguientes planes (INDECI, s.f.):

1. Plan de Preparación
2. Plan de Operaciones de Emergencia
3. Plan de Contingencia
4. Plan de Educación Comunitaria de Gestión Reactiva

5. Plan de Rehabilitación

C. Desarrollo de las capacidades para la respuesta

Se fomenta las diversas capacidades humanas, organizacionales, técnicas y de investigación que son necesarias para formar un conjunto de recursos capacitados con el fin de ejecutar los planes indicados. (INDECI, s.f.).

D. Gestión de recursos para la respuesta

La gestión de recursos para la respuesta empieza con un diagnóstico de los recursos existentes y tomando en cuenta los fondos públicos, la movilización nacional y la cooperación internacional, para así reunir el conjunto de bienes e infraestructura necesarios para responder a emergencias y desastres. (INDECI, s.f.). También abarca las siguientes actividades:

- La adquisición de bienes de ayuda humanitaria, equipos de comunicación y de alerta temprana, vehículos para el transporte de la ayuda humanitaria, equipos de búsqueda y rescate.
- Infraestructura para los Centros de Operaciones de Emergencia.
- Almacenes de bienes de ayuda humanitaria y alimentos.
- Polígonos de entrenamiento para búsqueda y rescate.
- Determinar zonas seguras para la instalación de albergues de uso temporal.
- Maquinaria para la remoción de escombros, limpieza de vías, plantas potabilizadoras, infraestructura temporal, entre otros. (INDECI, s.f.).

E. Monitoreo y alerta temprana

Consiste en el seguimiento permanente de los peligros y la comunicación a las autoridades para que con base en la información recopilada tomen las decisiones que correspondan para salvar la vida de la población (INDECI, s.f.).

F. Información pública y sensibilización

Se desarrolla y fortalece los canales de comunicación y difusión, a nivel nacional para que las autoridades y la población conozcan los riesgos existentes y las medidas adecuadas para la respuesta humanitaria (INDECI, 2014b, p. 21).

2.4.1.2. Proceso de respuesta

Las acciones que se ejecutan en el proceso de respuesta están relacionadas a sus subprocesos que a continuación se reseñan.

a. Conducción y coordinación de la atención de la emergencia o desastre

Permite organizar las acciones y recursos disponibles para atender a la población afectada con base en la información que generan los Centros de Operaciones de Emergencia (INDECI, 2014b, p. 29).

b. Análisis operacional

Es el conjunto de acciones que permite identificar daños, analizar necesidades, y asegurar una oportuna intervención para satisfacer con recursos a la población afectada. Se desarrolla a través de los procedimientos de Evaluación de Daños y Análisis de Necesidades (EDAN), Sistema Nacional de Información para la Respuesta y Rehabilitación (SINPAD), Sistema de Información Geográfica, Inventarios de Recursos Humanos y Materiales, Información de Escenarios de Riesgos, entre otros (INDECI, 2014b, p. 29).

c. Búsqueda y salvamento

Abarca las actividades para la localización de personas atrapadas o aisladas en diversas situaciones de peligro, para su extracción y traslado hacia zonas seguras (INDECI, 2014b, p. 30).

d. Salud

Comprende las acciones básicas para la atención y estabilización de los pacientes (INDECI, 2014b, p. 30).

e. Comunicaciones

Conjunto de acciones para asegurar la disponibilidad y el funcionamiento de los medios de comunicación que permitan la coordinación entre los actores responsables, durante la emergencia o desastre (INDECI, 2014b, p. 31).

f. Logística en la respuesta

Permite satisfacer las necesidades prioritarias de la población en las zonas afectadas utilizando los medios de transporte apropiados (INDECI, 2014b, p. 31).

g. Asistencia humanitaria

Comprende el desarrollo y la coordinación de las acciones vinculadas a la atención que requieren las personas afectadas por una emergencia o desastre, en especial, lo relacionado con brindar techo, abrigo, alimento, enseres y herramientas. (INDECI, 2014b, p. 32).

h. Movilización

Son las acciones del Gobierno Nacional para emplear los recursos humanos disponibles (médicos, ingenieros, arquitectos, voluntarios, entre otros) y materiales operativos (maquinaria pesada, hospitales campaña, entre otros) para brindar la atención oportuna ante situaciones de emergencia o desastres (INDECI, s.f.).

2.4.1.3. Proceso de rehabilitación

Se refiere a los procedimientos o acciones en los cuales se reestablecen los servicios públicos indispensables después de una emergencia o desastre.

2.5. Actividades críticas durante una emergencia

Uno de los efectos negativos que ocasiona los desastres es la destrucción de viviendas y hogares así como la pérdida de bienes personales. En estas circunstancias es evidente el sufrimiento humano y la situación de vulnerabilidad de la población que se ve forzada a desplazarse de sus domicilios e incluso de su localidad (Cruz Roja, 2008). Con el fin de mitigar de manera más rápida el sufrimiento humano y reducir la exposición al desastre, en la etapa de emergencia se desarrolla unas actividades críticas que a continuación se explica.

2.5.1. Plan de evacuación en caso de desastres

La evacuación es una estrategia en caso de emergencia por la cual las personas son desplazadas desde una zona peligrosa hacia un área segura para reducir las consecuencias del desastre (Pourrahmani, Reza, & Mostafavi, 2015).

Un plan de evacuación debe comprender la formación de una delegación encargada y los entes participantes para la evacuación a gran escala de las personas a las zonas más seguras, según el Plan de Evacuación "Callao 2005" (INDECI, 2005), dicho comité cumple las siguientes funciones durante una emergencia:

- Poner en marcha el Despacho Municipal el Centro de Operaciones de Emergencia (COE) y el Plan de Operaciones de Emergencia (POE).
- Empadronar a las personas y establecimientos de las áreas que podrían ser afectadas.
- Coordinar la recepción y distribución de ayuda a los damnificados.
- Coordinar la asignación de voluntarios y/o brigadistas.

Asimismo, la comunicación dentro del desastre es necesaria para mantener una comunicación fluida entre los responsables del proceso de evacuación y de la población ubicada en la zona de peligro a las zonas seguras.

Además, las instituciones que llevarán a cabo el plan de evacuación son la Policía Nacional del Perú con la participación del Ejército del Perú. Colaboran también la Dirección de Salud, Dirección Regional de Educación, entidades de servicios básicos (luz, agua, comunicación), la Cruz Roja Peruana – Callao entre otras instituciones (INDECI, 2005).

2.5.2. Albergues provisionales

Los desastres en su mayoría afectan al sector vivienda y en consecuencia gran parte de la población se queda sin techo, abrigo y alimento. Una de las medidas para brindar atención directa a los damnificados es a través de los albergues en campamentos o en infraestructuras identificadas como lugares seguros. Asimismo, una adecuada administración de los albergues permite satisfacer las necesidades prioritarias de techo, abrigo y alimento de los damnificados (INDECI, 2006).

Asimismo, en la planificación de los albergues hay que tener en cuenta el rol primordial que adquiere la comunidad. Así, en una emergencia que ocasiona graves daños en la infraestructura existente, se debe contemplar la opción de que los afectados sean acogidos por familiares y/o amigos. Otra alternativa es el alojamiento en establecimientos destinados a este fin como residencias, hoteles, etc. En ocasiones, estas dos opciones no cubrirán todas las necesidades, por tanto, será necesario adecuar y acondicionar espacios como áreas de albergue provisional para la población (Cruz Roja, 2008).

El INDECI (2006) contempla dos tipos de albergues para situaciones de desastres en el Perú:

1. Albergues de campo, como carpas familiares o módulos prefabricados. Las autoridades deben preparar una zona adecuada para la instalación del albergue.
2. Albergues en edificaciones existentes, tales como las instalaciones públicas aptas para albergar a las personas.

Asimismo, los objetivos importantes de los albergues según el INDECI (2006) son:

- Brindar seguridad y protección a los damnificados.
- Proteger contra el frío, calor, el viento y la lluvia.
- Brindar servicios básicos esenciales.
- Proporcionar sitios de almacenamiento de pertenencias y protección de bienes.
- Brindar seguridad emocional y de privacidad a los damnificados.

- Identificar una necesidad territorial.
- Promover la participación activa de los damnificados (INDECI, 2006).

Con respecto a la ubicación e instalación de los albergues provisionales, el INDECI (2006) señala que es importante tomar en cuenta los siguientes factores:

- Ubicación en áreas no vulnerables a desastres (distancia no menos de 50 km).
- Fácil accesibilidad (transporte).
- Área abierta, espaciosa, sin vegetación exuberante (insectos y roedores) o aguas estancadas.
- Espacios adecuados para desechos sólidos y líquidos.
- Evitar la cercanía a centros comerciales.
- Seguridad de la población, evitar zonas de elevada delincuencia (INDECI, 2006).

2.6. Conclusiones preliminares del análisis de la situación

El incremento de las inundaciones en América Latina en los últimos 30 años es un indicador alarmante para la población. En el Perú, una de las causas más relevantes de las inundaciones es el fenómeno de El Niño que afecta a la costa norte del Perú. Se ha registrado 3,236 casos de inundaciones desde 1975 hasta el 2013 (DesInventar, 2016). Además, se estima que los daños económicos ocasionados por inundaciones ascienden a 6,352 millones de soles entre los años 1970 al 2013 (DesInventar, 2016).

La actual gestión de riesgos de desastres en el Perú se encarga de mitigar los riesgos así como actuar ante posibles desastres. Entre sus principales procesos de respuesta, se encuentran la evacuación de las personas hacia sitios seguros y la instalación de albergues.

Las decisiones que toman las autoridades son complejas ya que deben de tener en consideración varios aspectos de acuerdo con la situación. Por ejemplo, los costos que se incurren para instalar un albergue, el stock de alimentos para ayuda, distancias entre centros de ayuda, entre otros son algunos aspectos importantes en la toma de decisiones.

Por lo tanto, uno de los principales problemas que surgen durante una emergencia es que existen muchas formas de evacuar a las personas. Debido al gran número de variables, el uso de herramientas puede ser eficaz para que las entidades responsables tomen mejores decisiones. El objetivo general de este trabajo es

elaborar un plan de prevención, utilizando técnicas de optimización, para evacuar a las personas y proteger la integridad de los afectados en caso de inundación.

El territorio peruano tiene muchas zonas vulnerables por inundaciones. Ante la necesidad de realizar un análisis específico, se propone analizar una provincia del Perú que evidencie un gran impacto a causa de las inundaciones. Al respecto, las evidencias señalan que la mayor cantidad de personas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos se encuentran en la localidad de Piura, de acuerdo con un estudio de SINAGERD (2014). Por otro lado, Lima y Callao son considerados como las provincias más vulnerables ante un tsunami debido a la cercanía al mar, a las estructuras de las viviendas y al gran número de afectados en caso ocurriese una emergencia (PREDES, 2009).

Asimismo, desde un punto de vista socioeconómico, el departamento de Lima y Callao concentra el mayor porcentaje del PBI del Perú y también se encuentra la mayor cantidad de población económicamente activa (PEA) representando el 30.88% del país (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2016b). El gráfico 2.10 muestra un diagrama comparativo del PBI y PEA de todas las regiones del Perú.

Con base en las evidencias señaladas, se elige el departamento de Lima y Callao como objeto de estudio de esta tesis. Además, este departamento tiene más de 300,000 personas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos SINAGERD (2014), por lo cual sustenta la necesidad de proponer una mejora.

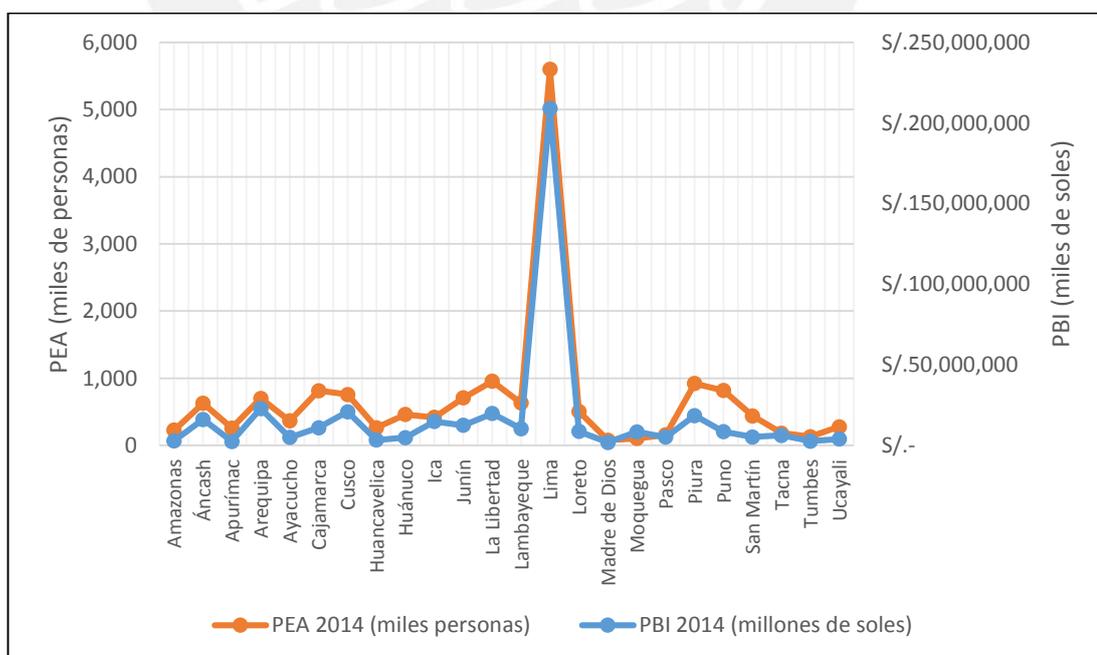


Gráfico 2.10. Situación económica del Perú por departamentos en el 2014.
Fuente: Tomado y adaptado del INEI (2016a, 2016b)

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL MODELO

En este capítulo se presenta el problema identificado y se muestra el estudio del marco conceptual y soluciones existentes. Finalmente, se presenta la solución y su alcance planteado.

3.1. Descripción del problema

Uno de los procesos críticos dentro del marco de respuesta ante desastres es tomar decisiones sobre los procedimientos de evacuación de la población afectada y conocer la localización geográfica de los almacenes y los albergues. Esto sucede debido a la diversidad de variables que se deben tomar en consideración como distancias entre almacenes, costos incurridos, tiempos de rescate, entre otros. Como consecuencia de las decisiones empíricas, se generan los siguientes problemas: retraso en el transporte de mercadería de ayuda, aumento en los costos de evacuación y parte de la población afectada debe trasladarse mucha distancia hasta llegar a los albergues.

Por tales motivos, se propone utilizar un modelo matemático que ayude a tomar decisiones basadas en los tiempos de evacuación y costos incurridos con el objetivo de determinar la ubicación geográfica de los albergues y almacenes. Además, con este modelo matemático se podrá conocer los traslados de cada centro inundado a determinados albergues para disminuir el desplazamiento.

3.1.1. Revisión de la literatura

La investigación sobre localización de instalaciones para la ayuda humanitaria usando modelos de investigación de operaciones se ha incrementado en los últimos años debido al incremento de la frecuencia de desastres naturales. Eventos como el terremoto de Haití del 2010 y el tsunami en Japón del 2011, entre otros han motivado el diseño de planes de prevención y atención a las poblaciones damnificadas que mejoren las acciones que despliegan las entidades gubernamentales y las organizaciones internacionales responsables de brindar ayuda humanitaria (Gaytán, Arroyo & Enriquez, 2011).

Mejía (2012) proporciona una revisión de los antecedentes en logística de desastres que han utilizado modelos matemáticos con enfoque multicriterio en la resolución de problemas relacionadas a la logística humanitaria. En la mayoría de los modelos se usó algoritmos heurísticos para obtener soluciones en un tiempo prudente, esto debido a la complejidad computacional al resolver el problema de optimización formulado.

Con respecto a modelos enfocados en desastres por inundaciones, uno de los estudios es el de Chang, Tseng & Chen (2007) quienes propusieron un modelo de optimización de dos etapas. En la primera etapa se agrupó las áreas de rescate y se clasificó según el nivel de emergencia de la zona, minimizando la distancia de los centros de distribución hacia las áreas de rescate. En la segunda etapa, se determinó las instalaciones candidatas a ser centros de distribución, en las cuales se ubicaría las cantidades apropiadas de equipos de rescate. Diferentes escenarios de niveles de lluvia fueron analizados con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica. Por su parte, Han, Yuan, Chin & Hwang (2006) construyeron un modelo de optimización que, en caso de inundación, selecciona las rutas de evacuación y el destino de las personas.

3.1.2. Planteamiento del problema

La zona de Lima Metropolitana está asentada en una zona altamente vulnerable en caso ocurra un sismo o maremoto. Una de las mayores catástrofes que sufrió fue el terremoto que ocurrió Lima y Callao el 28 de octubre de 1746 y que provocó un maremoto que destruyó la ciudad del Callao y produjo la muerte de más de 5,000 personas y solo 200 sobrevivieron (4% de la población). Hoy en día, un evento de esta naturaleza alteraría el orden demográfico, social y económico de la región de Lima Metropolitana (Jiménez et al., 2010).

Un estudio sobre el peligro de tsunamis en Lima y Callao realizado por Jiménez et al. (2010) junto con la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN), con la colaboración del Centro Peruano Japonés de Mitigación e Investigación de Desastres (CISMID), determinaron la vulnerabilidad frente a la ocurrencia de un maremoto (o tsunami) luego de un sismo de gran magnitud. El estudio definió dos escenarios sísmicos con las siguientes características:

1. Un escenario para un terremoto hipotético (magnitud = 8.5 Mw)³, con epicentro en el mar, frente al Callao. Corresponde al terremoto más probable que podría ocurrir en Lima.
2. Un escenario análogo al terremoto de 1746 (magnitud = 9.0 Mw), con área de ruptura desde Chimbote (al norte de Lima) hasta el sur de Pisco.

Los resultados del estudio determinan que las zonas de alta vulnerabilidad son las siguientes: Ventanilla (2.0 km de máxima inundación horizontal), Callao Puerto (0.7

³La escala sismológica de magnitud de momento (Mw) es una escala para medir los terremotos y su energía liberada. Es una magnitud que no presenta mucha saturación en comparación con las demás (Kanamori, 1977).

km de inundación), Villa – Chorrillos (1.2 km de inundación) y Lurín (1.5 km de inundación). La zona menos vulnerable está comprendida desde Punta Hermosa hasta Pucusana debido a los acantilados y a la topografía de la zona. Estos límites de máxima inundación corresponden al evento más probable de 8.5 Mw. (Jiménez et al., 2010).

Dicho estudio generó un mapa de inundación para el Callao. El gráfico 3.1 muestra las zonas afectadas en el Callao por un tsunami provocado luego de un terremoto de magnitud 8.5 Mw.

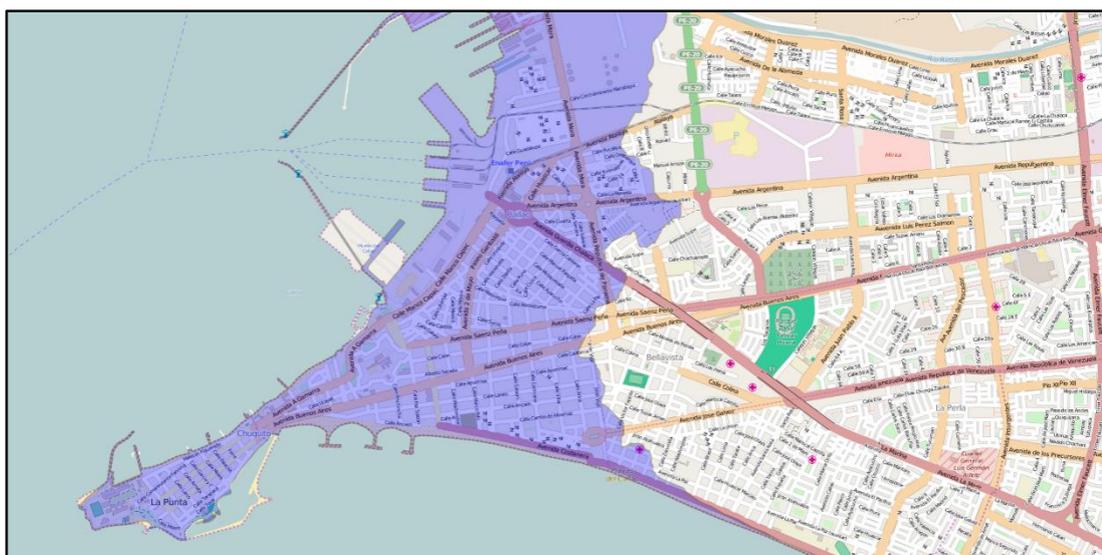


Gráfico 3.1. Zona de inundación en caso de terremoto 8.5 Mw en El Callao
Fuente: CISMID (s.f.)

Además, dicho estudio afirma que existen varias zonas altamente vulnerables, debido a la topografía de las zonas y por la densidad poblacional, como también por la severidad de la inundación. Esos distritos son Ventanilla, Callao, Chorrillos y Lurín.

También se puede identificar las zonas o distritos medianamente vulnerables. Sin embargo, este nivel de vulnerabilidad puede aumentar en los meses de verano debido al incremento de la densidad poblacional. Los distritos son Ancón, Santa Rosa, Villa El Salvador y Punta Negra.

Los distritos levemente vulnerables corresponden a los balnearios del sur. Sin embargo, este nivel de vulnerabilidad puede aumentar en los meses de verano debido al incremento de la densidad poblacional. Estos distritos son San Bartolo, Santa María y Pucusana.

El gráfico 3.2 muestra las zonas afectadas del litoral Lima – Callao, mostrando el detalle para los dos escenarios definidos que son los terremotos de 8.5 Mw (zona roja) y 9 Mw (zona naranja).

Debido a los peligros que presenta Lima – Callao, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) junto con el INDECI promovieron en el 2010 la implementación del Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres (SIRAD) que es un sistema de información que permite identificar los recursos existentes para la respuesta y para la recuperación temprana ante una eventualidad (INDECI & PNUD, 2011). En este sistema, se desarrollaron capas de información con ubicación geográfica de los recursos.

Uno de los recursos importantes identificados en el SIRAD son los albergues potenciales para reubicar a la población afectada en caso de emergencia. En total, el SIRAD reconoció 214 albergues potenciales para ser usados por los afectados cumpliendo los protocolos técnicos. En el gráfico 3.3 se muestran dichos albergues los cuales fueron clasificados por recomendable, posible y poco recomendable.

Un aspecto importante por considerar es el abastecimiento de bienes de ayuda humanitaria. Uno de estos bienes de ayuda es el alimento. Para distribuirlos, se requiere la participación de diferentes organizaciones. En la tabla 3.1 se muestran los recursos (establecimientos) disponibles según niveles de prioridad para casos de desastres. Los establecimientos mencionados proveen ayuda humanitaria a las zonas afectadas.

El Plan Logístico INDECI para Ayuda Humanitaria ante Emergencias o Desastres brinda una relación de requerimientos de las familias afectadas, cuya principal función es brindar apoyo a los afectados en caso de emergencia. La tabla 3.2 muestra la relación de bienes de ayuda humanitaria que se utiliza como marco referencial en caso de emergencia (INDECI, 2014c, p. 47).

El informe de preparación ante desastre sísmico y/o tsunami (INDECI & PNUD, 2010) propone la utilización de almacenes de alimentos para el abastecimiento de los bienes de ayuda humanitaria hacia los albergues. Los datos sobre las capacidades de los almacenes, su ubicación, condiciones, entre otros, se encuentran en el SIRAD (s.f.). El gráfico 3.4 ilustra las ubicaciones geográficas de los almacenes de alimentos.



Gráfico 3.2. Zona de inundación en caso de terremoto 8.5 Mw y 9 Mw en el Lima Metropolitana
Fuente: INDECI & PNUD (2010)

Tabla 3.1. Recursos esenciales para la respuesta y atención de una emergencia

Jerarquización	Descripción	Elementos Cuantitativos
Recursos esenciales en situación de emergencia	Elementos esenciales en periodo normal - mercado mayorista - mercado de distribución - supermercado	15 34 44
	Recursos específicos de emergencia - almacén de ayuda alimentaria - almacén móvil de ayuda alimentaria - sede y oficina de ayuda alimentaria	2 3 3
Recursos de segundo nivel en situación de emergencia	Recursos de apoyo a los recursos esenciales - centro de acopio PRONAA - plataforma logística	38 10
	Otros elementos de interés - otro centro PRONAA (comedor) - centro INABIF - almacén de fábrica de alimentos - almacén de supermercado - proveedor de alimentos - zona metropolitana de producción de alimentos	158 16 39 93 1

Fuente: Tomado de INDECI & PNUD (2010)

Tabla 3.2. Relación de bienes de ayuda humanitaria

Alimentos	Abrigo	Enseres	Herramientas	Techo
Raciones frías	Bota de jebe	Balde de plástico	Barreta	Carpa pesada (cinco personas)
Raciones crudas	Cama plegable	Cuchara para sopa	Carretilla	Carpas livianas (cinco personas)
	Frazada poliéster	Kit de higiene	Pala	
	Colcha	Vaso plástico	Pico	
	Sábanas	Plato hondo de plástico		
	Botas PVC	Plato tendido de plástico		
	Colchón espuma	Tazón de plástico		

Fuente: Tomado de INDECI (2014c)

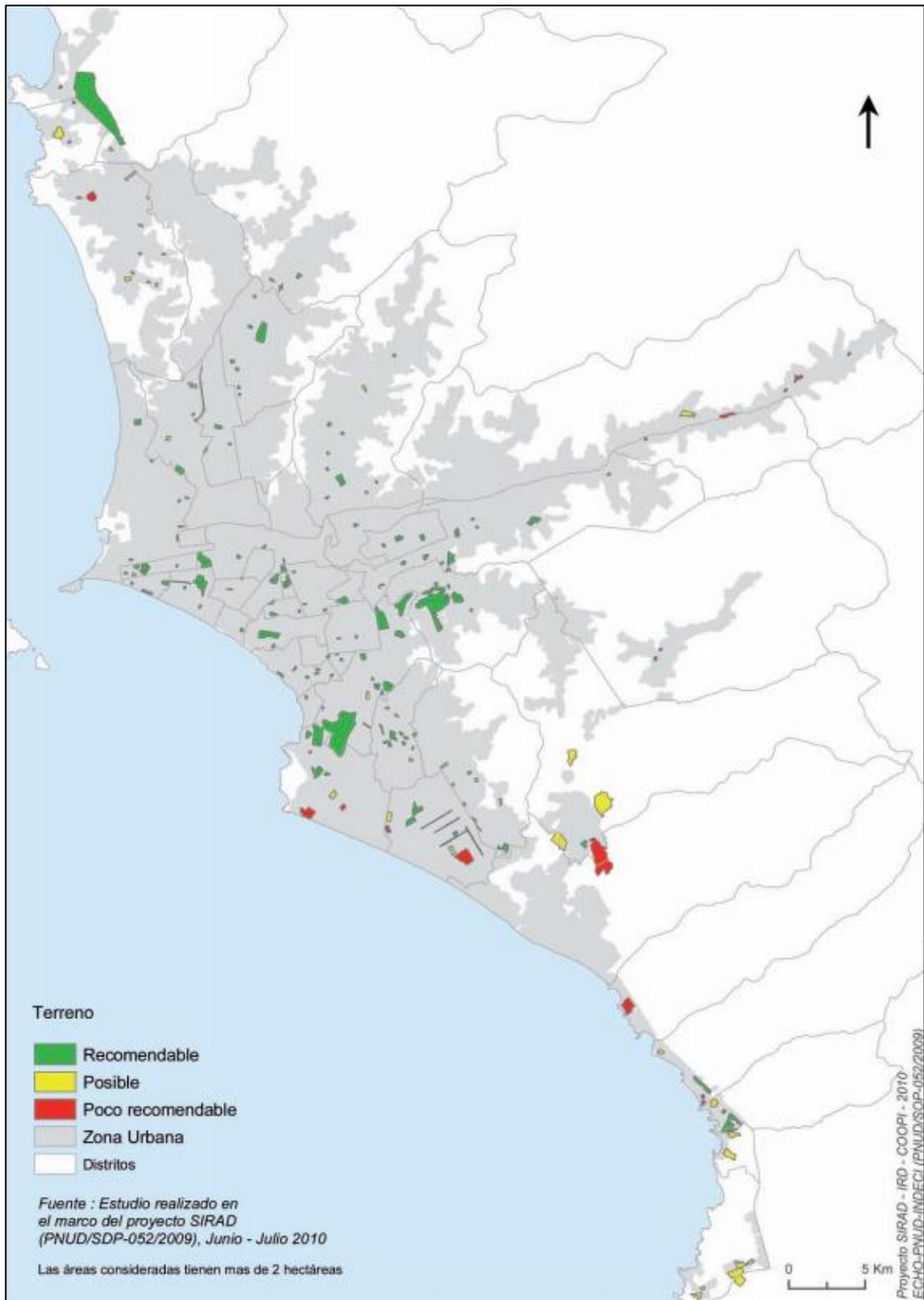


Gráfico 3.3. Albergues potenciales en Lima Metropolitana
Fuente: Tomado de INDECI & PNUD (2010)

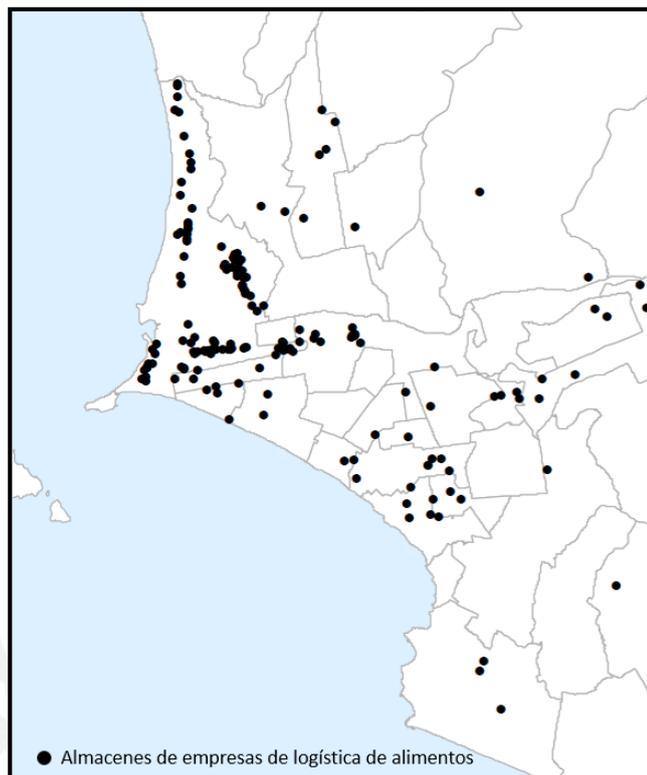


Gráfico 3.4. Ubicación de almacenes de empresas de logística de alimentos
Fuente: Tomado de INDECI & PNUD (2010)

3.1.3. Metodología de trabajo

El objetivo de la metodología es mostrar los procedimientos para formular y resolver el problema de evacuación de las personas en casos de inundación para Lima Metropolitana mediante la utilización de herramientas de optimización.

- 1) Se plantea dos escenarios de estudio que fueron citados por Jiménez et al. (2010) en la sección 3.1.2 del planteamiento del problema. El primer escenario es el estudio de las consecuencias de la inundación causada por un terremoto de 8.5 Mw con epicentro en el mar frente al Callao. El segundo escenario son las consecuencias de la inundación causada por un terremoto de 9.0 Mw con la misma ubicación para el epicentro.
- 2) Con base en los escenarios planteados, se recopila la información de las zonas afectadas. En el 2010, el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) y la ONG *Cooperazione Internazionale* (COOPI) desarrollaron el proyecto SIRAD el cual consistió en el diseño y elaboración de una base de datos que localiza y caracteriza los recursos para la respuesta ante un sismo o tsunami en Lima Metropolitana (SIRAD, s.f.). Dentro de la información de zonas afectadas, se segmentaron los datos de las viviendas en manzanas. El gráfico 3.5 muestra un

ejemplo de cómo serían afectadas las manzanas del distrito de La Punta si ocurriese un tsunami luego de un terremoto de 8.5 Mw. Los datos registrados de cada manzana incluyen la cantidad de personas y de familias, el riesgo sísmico, el riesgo de tsunami según la magnitud del terremoto, entre otros datos.

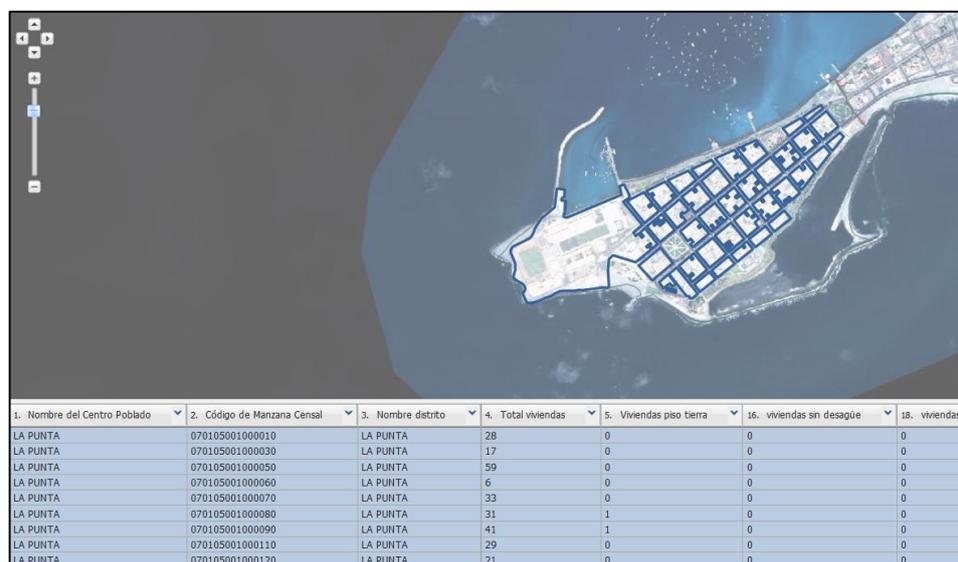


Gráfico 3.5. Visor SIRAD de las manzanas
Fuente: SIRAD (s.f.)

- Se agrupa las manzanas inundadas con el objetivo de crear grupos de referencia llamados zonas inundadas. Definir estas zonas es de mucha importancia para desarrollar el modelo matemático. Los criterios de agrupación son por su delimitación distrital, por su distancia radial y por la cantidad de personas que contiene dicha agrupación. A continuación, se explican los detalles de cada tipo de agrupación.

Se considera como primera regla de agrupación la división política. Lima Metropolitana tiene 49 distritos y se tomará en cuenta sus límites para identificar las zonas inundadas por distrito. El gráfico 3.6 muestra la agrupación de las zonas inundadas en tres partes por las delimitaciones distritales (Chorrillos, Villa El Salvador y Lurín). Las líneas naranjas representan las manzanas afectadas en caso de un tsunami en el primer escenario, mientras que los círculos con fondo verde representan su agrupación (zonas inundadas).

Debido a que algunos distritos de Lima Metropolitana presentan un extenso litoral, se propone dividir estas agrupaciones distritales en grupos que tengan distancias radiales definidas. Por lo tanto, se agrupan las manzanas en áreas circulares que tienen radios con distancias entre 0.5 a 4 kilómetros. El gráfico 3.7 muestra las zonas inundadas definidas para el distrito de Ventanilla.

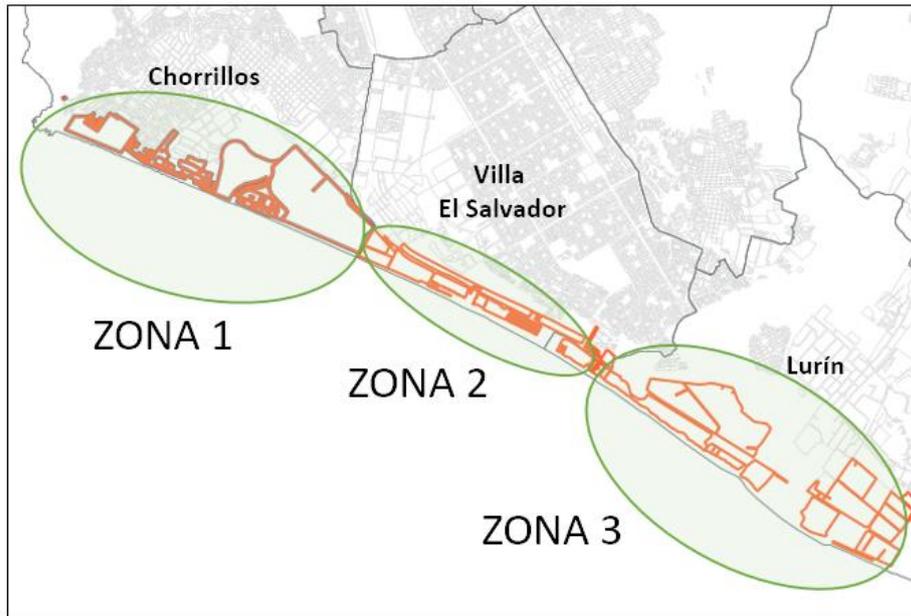


Gráfico 3.6. Delimitación distrital de zonas inundadas en caso de inundación
 Elaboración propia
 Fuente: SIRAD (s.f.)

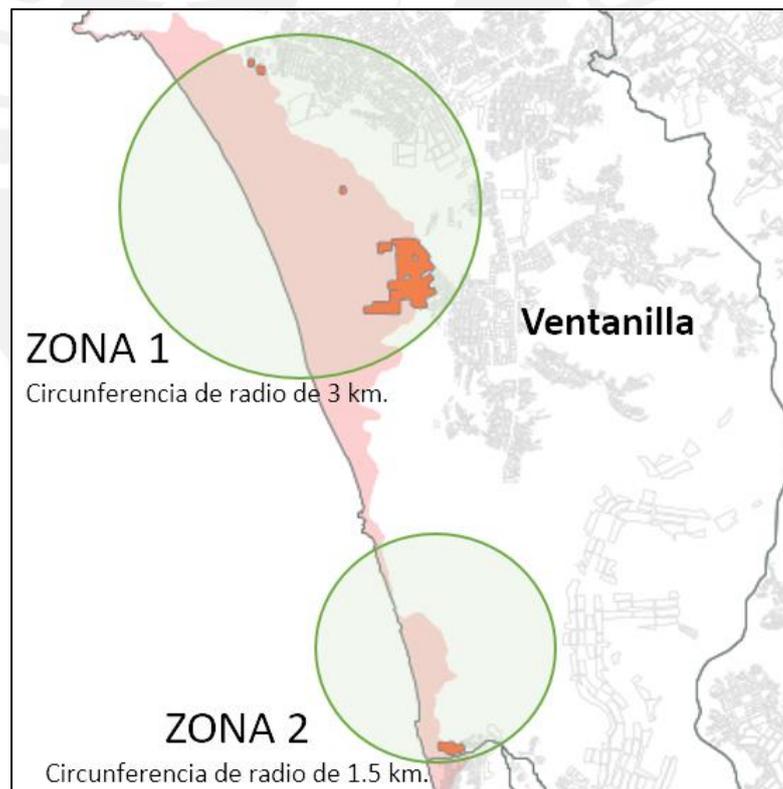


Gráfico 3.7. Agrupación de las manzanas afectadas en el distrito de Ventanilla utilizando el criterio de distancias
 Elaboración propia
 Fuente: SIRAD (s.f.)

El último criterio de agrupación está relacionado con la cantidad de personas que viven en determinada zona agrupada.

Debido a que se resolverá el problema utilizando métodos de optimización, es importante definir el número de variables que se utilizarán. Hillier y Lieberman (2010, p. 451) indican que uno de los principales factores que inciden en el esfuerzo computacional para resolver un programa entero es la cantidad de variables enteras. Por tal motivo, se propone definir un número de zonas adecuado ya que estas actúan como variables dentro del modelo matemático. Si se define una zona con una cantidad reducida de personas, complica la resolución ya que aumenta notablemente el número de variables a utilizar. Por lo tanto, las zonas que contienen menos de 50 personas se agrupan con una zona de inundación cercana para considerarlo como una sola zona inundada. En el gráfico 3.8 se observa el caso planteado en el distrito de Punta Hermosa, el cual se agrupa en una sola zona.

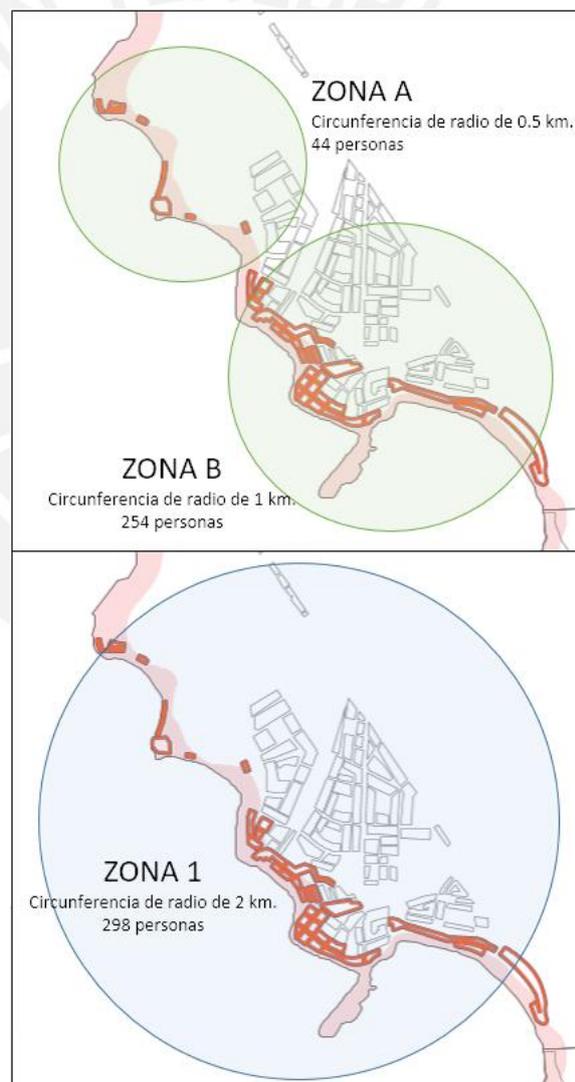


Gráfico 3.8. Agrupación de dos zonas por el criterio cantidad de personas en el distrito Punta Hermosa
Elaboración propia
Fuente: SIRAD (s.f.)

En caso que una zona tenga más de 20,000 personas, se dividirá en áreas de menor tamaño que contengan menor número de personas. Con el objetivo de realizar un análisis adecuado, se debe segmentar las grandes concentraciones de personas para saber con mayor precisión la movilización de los afectados. En el gráfico 3.9 se ejemplifica esta separación en el distrito del Callao.

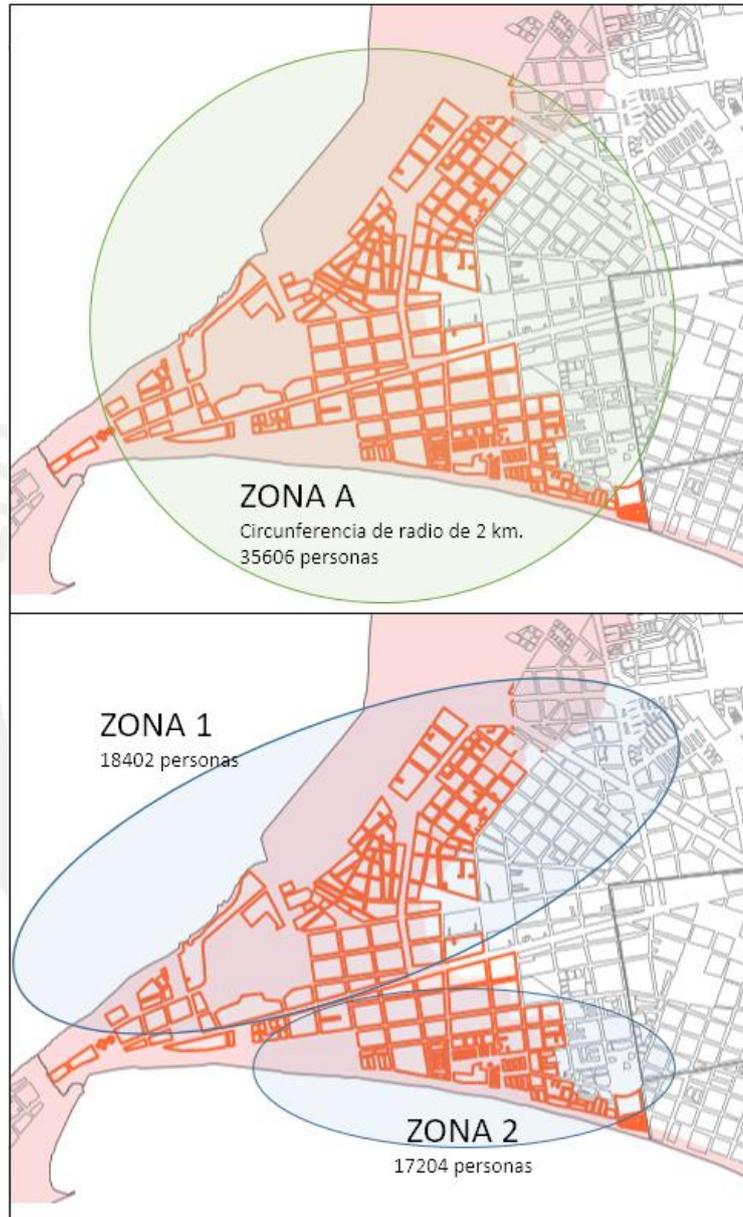
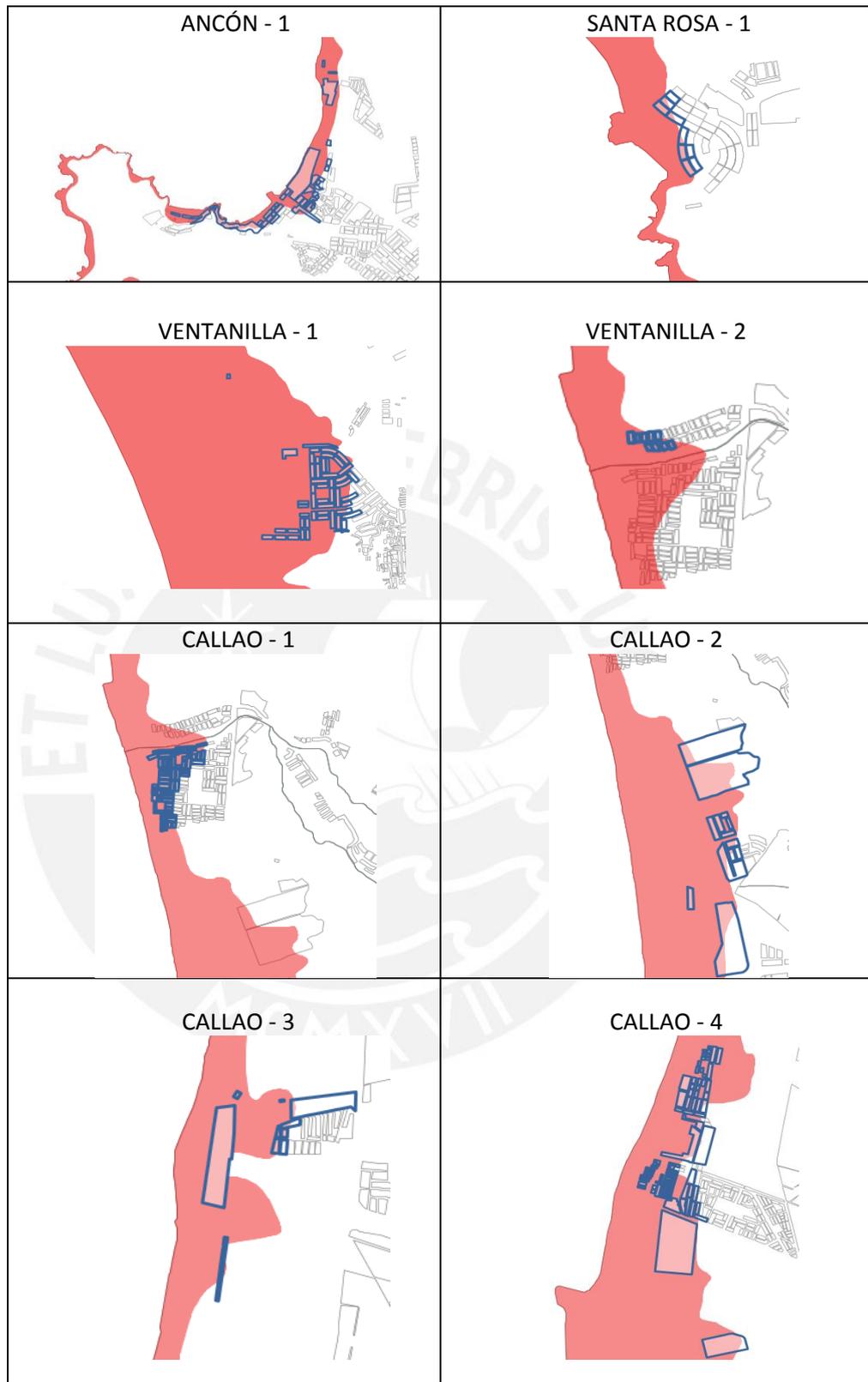
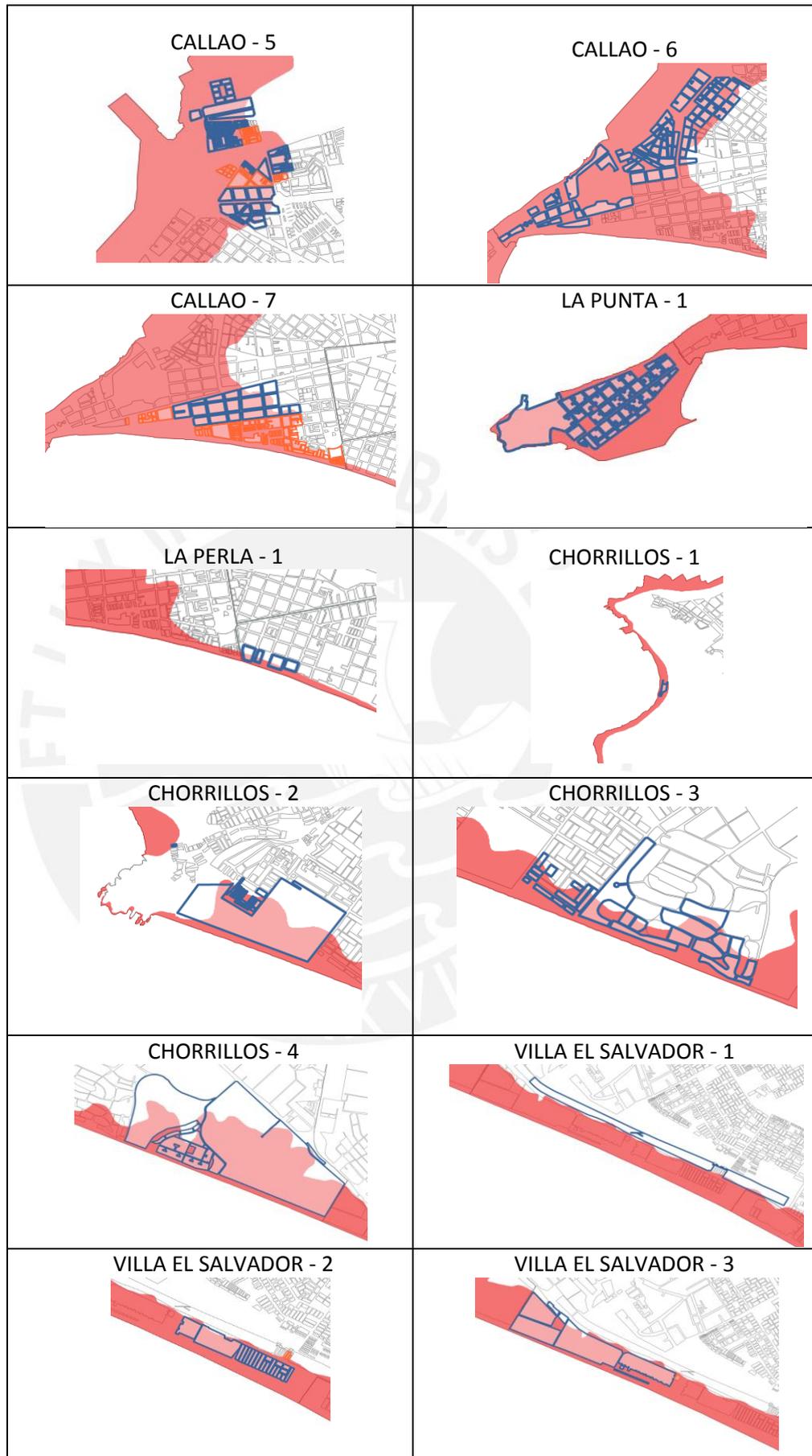
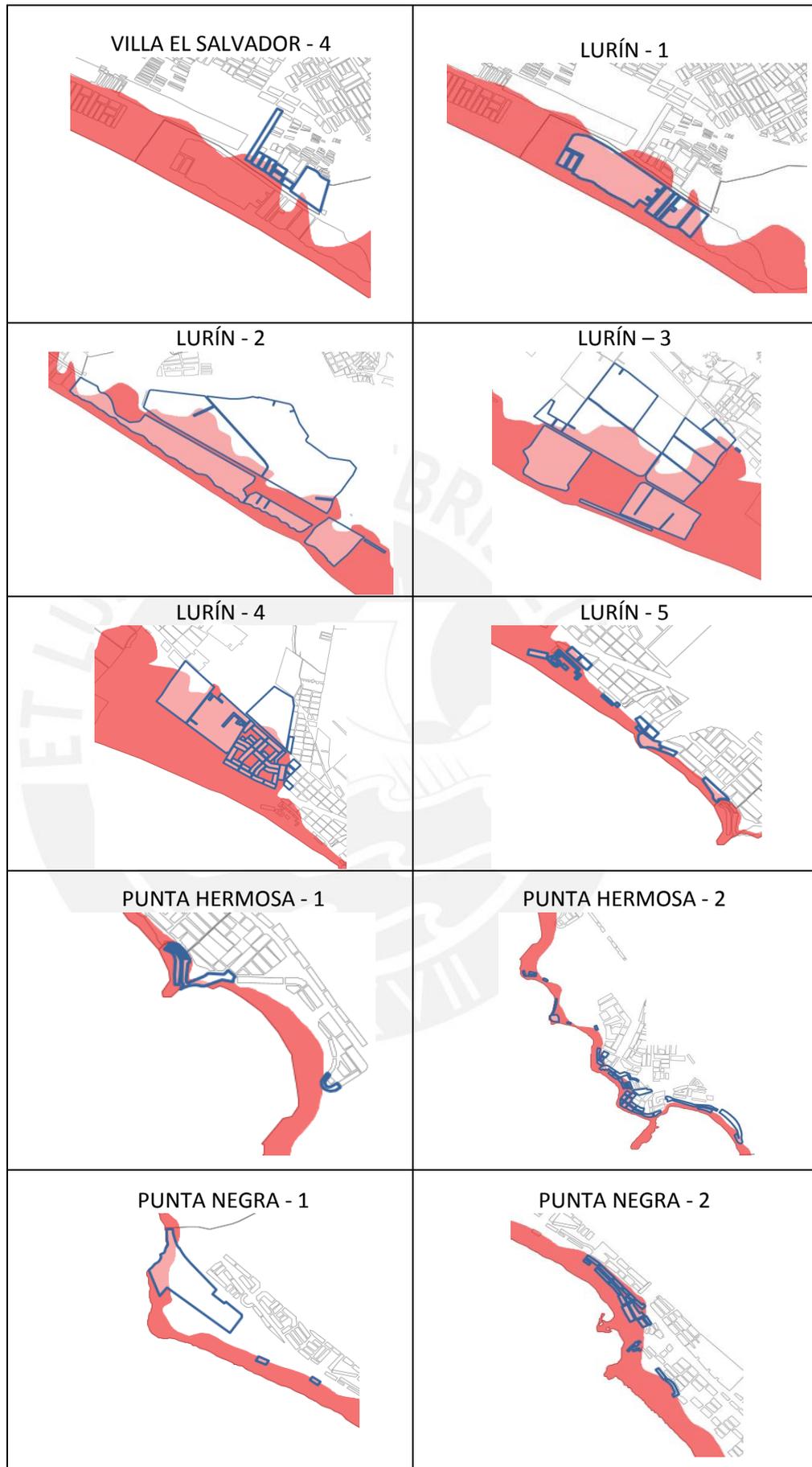


Gráfico 3.9. Separación de zona inundada por el criterio personas en el distrito del Callao
Elaboración propia
Fuente: SIRAD (s.f.)

- 4) Se recopila información de las manzanas afectadas por tsunami y se definen las zonas inundadas mediante el procedimiento descrito en el paso 3. A continuación, se presenta, en el gráfico 3.10, las zonas inundadas ante la ocurrencia de un tsunami.







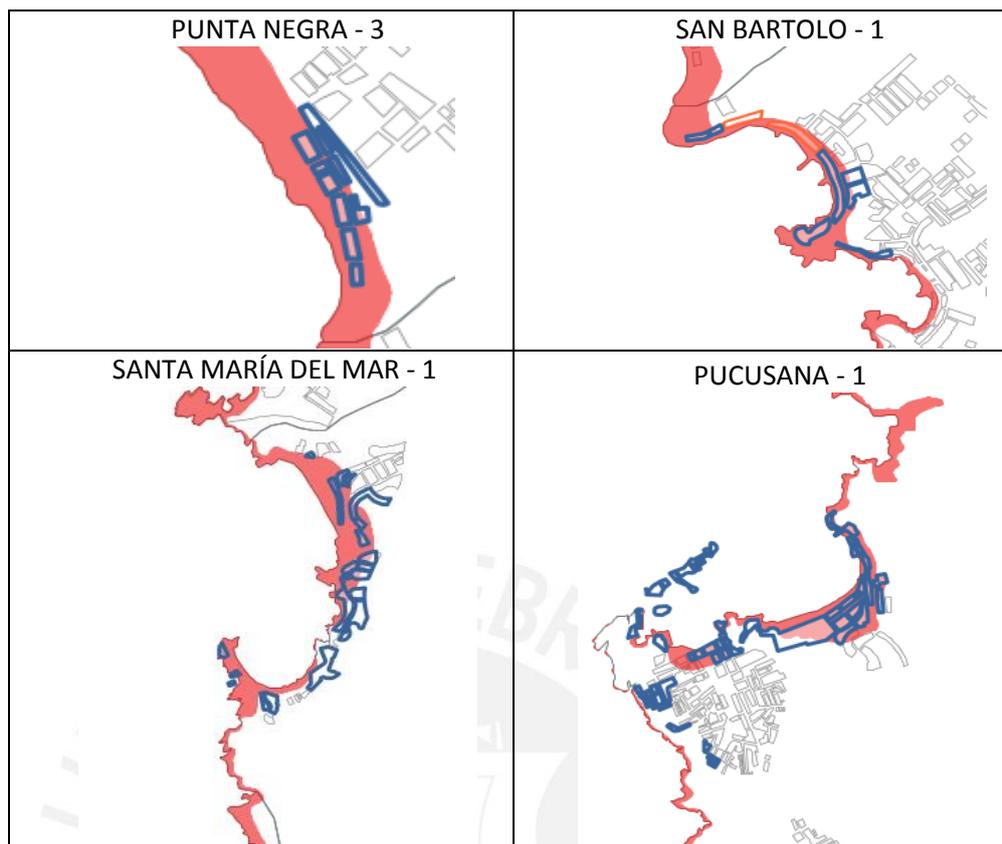


Gráfico 3.10. Zonas inundadas en el litoral de Lima Metropolitana.
Elaboración propia
Fuente: SIRAD (s.f.)

- 5) Dentro de la base de datos del SIRAD, se encuentra las áreas que sirven como albergues potenciales en caso de desastres. En total suman 214 áreas que pueden utilizarse como albergues, por lo que solo se escogerán los más relevantes ya que si se utilizan todos los albergues existentes, la complejidad computacional del modelo será mayor. Los criterios de selección de los albergues son que no corran peligro de ser inundados y que se encuentren ubicados en un radio de 5 kilómetros de las zonas inundadas como se muestra en el gráfico 3.11 (área de color azul).
- 6) Se recopilará la información de los almacenes potenciales de alimentos existentes que llevarán los bienes de ayuda a los albergues potenciales. En total suman 180 almacenes potenciales y serán seleccionados para la formulación del modelo los que tengan información sobre la superficie de almacenamiento y los que se encuentren ubicados en un radio de 5 kilómetros de los albergues potenciales como se muestra en el gráfico 3.12 (área de color púrpura).



Gráfico 3.11. Selección de albergues potenciales
Elaboración propia en plataforma ArcGIS
Fuente: SIRAD (s.f.)



Gráfico 3.12. Selección de almacenes potenciales. Plataforma ArcGIS
Elaboración propia en plataforma ArcGIS
Fuente: SIRAD (s.f.)

- 7) Se identifica los alimentos necesarios para el abastecimiento de los albergues, así como las cantidades consumidas por persona o familia que se requieran.

- 8) Una vez identificados la ubicación de todos los elementos permitidos, se procede a calcular las distancias entre las zonas afectadas y los albergues potenciales, y entre los albergues potenciales con los almacenes potenciales de alimentos. El cálculo se basa en las distancias de recorrido por carretera para vehículos terrestres y distancias de recorridos a pie. La herramienta que se usó fue el software ArcGIS para el cálculo de distancias (ArcGIS Desktop, 2017).
- 9) Se utiliza el software ArcGIS para calcular el tiempo de traslado entre las zonas afectadas y los albergues potenciales, y entre los albergues potenciales con los almacenes potenciales de alimentos.
- 10) Se calcula los requerimientos de recursos de las personas afectadas que deben ser suministrados a los albergues donde se encuentran. Para este cálculo, se considera un promedio de 30 días de alimentos básicos, incluyendo 3 días iniciales para el suministro de raciones frías (INDECI, 2013, p. 6).
- 11) Luego se formula un modelo de programación lineal entera mixta con dos funciones objetivos para optimizar el problema de evacuación de personas.
- 12) Luego se aplica métodos de generación de soluciones óptimas para problemas con dos funciones objetivos. El conjunto de soluciones óptimas que se generen forman la frontera de Pareto.
- 13) Se realiza el análisis de decisiones multicriterio utilizando el método ELECTRE I. Se analiza las soluciones óptimas con atributos adicionales (cantidad de almacenes y albergues utilizados) y se elige una solución que mejor represente el conjunto de soluciones de la frontera de Pareto.

3.1.4. Supuestos

Previo a realizar la formulación del modelo, se detalla a continuación los supuestos considerados en la recolección y utilización de datos.

1. Todos los habitantes de las zonas con peligro de inundación se trasladarán hacia los albergues potenciales luego del tsunami.
2. Se define como punto de referencia de las zonas inundadas el centro aproximado de sus respectivas áreas. Esto es de suma importancia ya que para calcular las distancias entre los elementos estudiados se cogen puntos, no áreas.
3. Todas las personas afectadas se trasladan caminando desde las zonas de inundación hacia los albergues potenciales.

4. Se considera que toda distribución de alimentos desde los almacenes potenciales hacia los albergues potenciales se realiza con camiones de 15 metros cúbicos.
5. Cada almacén potencial de alimentos es capaz de albergar hasta un volumen máximo de productos alimenticios en metros cúbicos. El SIRAD presenta una lista de almacenes potenciales en la cual algunos datos relevantes están incompletos. Por lo tanto, se considera que si el almacén potencial no tiene datos relevantes, no se puede utilizar en el modelo. Además, si tiene datos solo del área total del almacén, se asumirá que el 40% de esa área es la superficie de almacenamiento. Por último, una vez que se obtenga la superficie de almacenamiento, la capacidad del almacén será el 1% de la superficie de almacenamiento multiplicado por un apilamiento de 3 metros de altura.
6. Las personas que se alojan en los albergues permanecerán como máximo 30 días.

3.2. Formulación del modelo

El modelo de programación lineal entera mixta que se va a formular tiene dos funciones objetivos: minimizar el tiempo total requerido para evacuar a las personas, y minimizar el costo de transporte para abastecer de alimentos a los albergues. El diseño del modelo se hizo con base en el estudio y modelo diseñado por Gaytán, Arroyo & Enríquez (2011); sin embargo, se realizó modificaciones al modelo para adaptarlo a los supuestos del problema y al tipo de datos utilizados. Además, se omitieron algunos criterios como coste de traslado de personas afectadas, costo de almacenamiento, entre otros que no están en el alcance del problema a resolver.

Para la formulación, se debe tomar en cuenta cómo se comporta la red de distribución durante un caso de emergencia de gran magnitud. Los nodos que se identifican con el subíndice j representan las zonas inundadas, los nodos que se identifican con el subíndice k representan los albergues potenciales, los nodos con el subíndice g representan los almacenes potenciales y, por último, los nodos que se identifican con el subíndice l representan los tipos de alimento de ayuda.

El gráfico 3.13 muestra cómo son las relaciones de la red de distribución en caso de desastres. Desde las zonas inundadas j son evacuadas las personas afectadas hacia los albergues k . Luego, los albergues son suministrados con diferentes alimentos l que provienen de los almacenes potenciales g .

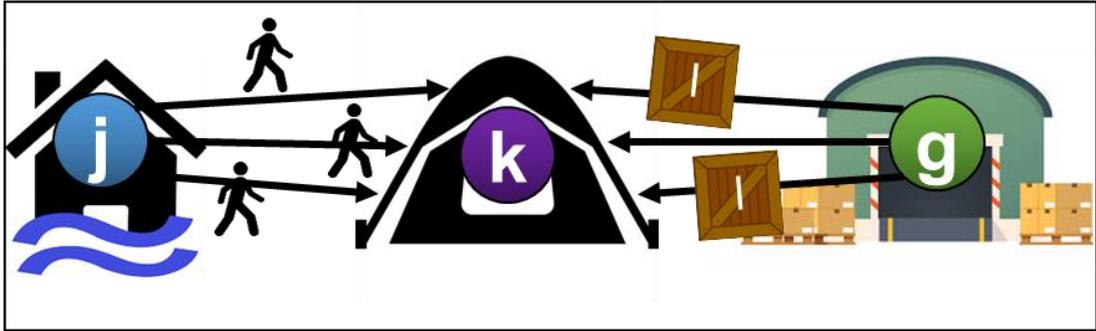


Gráfico 3.13. Representación de la red de distribución ante una inundación.

Elaboración propia

Fuente: tomado y adaptado de Gaytán, Arroyo & Enríquez (2011)

Cada conjunto (zonas inundadas, almacenes, albergues, alimentos y medios de transporte) se representan con letras mayúsculas y los índices que hacen referencia a los elementos de estos conjuntos se representan con minúsculas. A continuación, se detallan los conjuntos, parámetros, variables de decisión, funciones objetivos y restricciones del modelo propuesto.

Conjuntos e índices

$G = \{\text{Conjunto de zonas inundadas}\}; g \in G$

$J = \{\text{Conjunto de almacenes potenciales de alimentos}\}; j \in J$

$K = \{\text{Conjunto de albergues potenciales}\}; k \in K$

$L = \{\text{Conjunto de tipos de alimentos para ayuda}\}; l \in L$

$M = \{\text{Conjunto de medios de transporte}\}; m \in M$

Variables de decisión

W_{gmk} : cantidad de personas que se desplazan desde la zona inundada $g \in G$ hasta el albergue $k \in K$ por el medio de transporte $m \in M$ donde $m = 1$ es a pie.

X_{jkl} : cantidad de unidades del producto $l \in L$ a ser enviada desde el almacén $j \in J$ al albergue $k \in K$

$Y_k \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{si el albergue } k \in K \text{ se utiliza} \\ 0, \text{no se utiliza albergue } k \in K \end{array} \right\}$

$\varphi_j \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{si el almacén } j \in J \text{ se utiliza} \\ 0, \text{no se utiliza el almacén } j \in J \end{array} \right\}$

$M_{jk} \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{si el almacén } j \in J \text{ atiende al albergue } k \\ 0, \text{si el almacén } j \in J \text{ no atiende al albergue } k \end{array} \right\}$

Parámetros

C_{jk} : distancia recorrida desde el almacén $j \in J$ hacia el albergue $k \in K$.

K_j : capacidad máxima de cada almacén $j \in J$ en metros cúbicos.

Q_{gmk} : distancia recorrida desde la zona inundada $g \in G$ en el modo $m \in M$ hacia el albergue $k \in K$.

T_{gmk} : tiempo de recorrido desde la zona inundada $g \in G$ hasta el albergue $k \in K$ a través del modo $m \in M$.

α_l : cantidad de personas que pueden consumir una unidad del producto tipo $l \in L$ en el periodo de emergencia.

S_k : capacidad máxima de personas del albergue $k \in K$.

P_g : cantidad de personas afectadas en las zonas inundadas $g \in G$.

vol_l : volumen del producto tipo $l \in L$ en m^3 .

u : una constante positiva lo suficientemente grande.

Funciones objetivos

(1) Minimizar el tiempo total para evacuar a todas las personas afectadas. El cálculo del tiempo se realiza multiplicando la cantidad de personas que se desplazan hacia los albergues (W_{gmk}) por el tiempo promedio que se demoran en el traslado (T_{gmk}).

Función objetivo (1)

$$\text{Min} \sum_{g \in G} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} W_{gmk} T_{gmk}$$

(2) Minimizar el costo de transporte por abastecer alimentos a los albergues. El cálculo se realiza multiplicando el volumen de cada producto (vol_l) por el número de unidades a trasladar (X_{jkl}) por la distancia recorrida desde el almacén hasta llegar al albergue (C_{jk}). Luego a este resultado se le multiplica el costo de transporte que es 450 soles⁴ por un flete de 80 km de recorrido con una capacidad de carga de 15 m³. El costo aumenta proporcionalmente a la distancia recorrida y a la capacidad de carga.

⁴ Precios referenciales al 12/2017 de la empresa de transporte Inversiones Moy S.A.C.

Función objetivo (2)

$$\text{Min} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \text{vol}_l C_{jk} X_{jkl} * \left[\frac{450}{80 * 15} \right]$$

Restricciones

(1) La cantidad de suministros que se envía desde los almacenes hacia los albergues no debe exceder la capacidad de los almacenes. La multiplicación del volumen de cada producto (vol_l) por el número de productos enviados (X_{jkl}) debe ser menor a la capacidad de cada almacén (K_j). Para asegurar la utilización de los almacenes cuando $X_{jkl} > 0$, se usa la variable binaria (φ_j) y se multiplica por la capacidad del almacén (K_j).

Restricción (1)

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \text{vol}_l X_{jkl} \leq K_j \varphi_j, \quad \forall j \in J$$

(2) No se debe utilizar un almacén que utiliza menos del diez por ciento de su capacidad. Esta restricción evita que el modelo escoja almacenes en exceso ya que si esto ocurriese generaría costos por apertura innecesarios.

Restricción (2)

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \text{vol}_l X_{jkl} \geq 10\% K_j \varphi_j, \quad \forall j \in J$$

(3) La cantidad de personas que se envían a un albergue (W_{gmk}) no debe exceder la capacidad de dicho albergue (S_k) siempre y cuando se utilice. Para garantizar la utilización de los albergues cuando $W_{gmk} > 0$, se usa la variable binaria (Y_k) y se multiplica por su capacidad (S_k).

Restricción (3)

$$\sum_{g \in G} \sum_{m \in M} W_{gmk} \leq S_k Y_k, \quad \forall k \in K$$

(4) No se debe utilizar un albergue si el número de personas evacuados que llegan es menos del diez por ciento de su capacidad para evitar costos por apertura innecesarios.

Restricción (4)

$$\sum_{g \in G} \sum_{m \in M} W_{gmk} \geq 10\% S_k Y_k, \quad \forall k \in K$$

(5) Todos los residentes de las zonas afectadas (P_g) se trasladan a algún albergue. Con esta ecuación se garantiza que todos los afectados son movilizados.

Restricción (5)

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} W_{gmk} = P_g, \quad \forall g \in G$$

(6) Con este grupo de restricciones, se garantiza que a cada albergue se le abastece una cantidad de productos necesarios (X_{jkl}) para que la población pueda sobrevivir en el periodo de emergencia. La cantidad de personas que se desplazan hacia un albergue (W_{gmk}) debe ser menor a los suministros enviados a dicho albergue multiplicado por el número de personas que pueden consumir una unidad de dicho suministro (α_l). En otras palabras, esta restricción asegura el envío de los productos de ayuda y calcula las cantidades que deben enviarse.

Restricción (6)

$$\sum_{g \in G} \sum_{m \in M} W_{gmk} \leq \alpha_l \sum_{j \in J} X_{jkl}, \quad \forall k \in K, l \in L$$

(7) Se garantiza que se envía suministro de ayuda a un albergue desde un almacén (X_{jkl}) solo si el albergue k se habilita ($M_{jk} > 0$). Si el almacén j provee a un albergue k , entonces este grupo de restricciones garantiza el flujo de productos necesarios para llevar a cabo esa operación. Para garantizar el flujo utilizado, se utiliza la variable binaria (M_{jk}) y se multiplica por una constante lo suficientemente grande (μ).

Restricción (7)

$$\sum_{l \in L} X_{jkl} \leq \mu * M_{jk}, \quad \forall k \in K, j \in J$$

(8) Cada albergue debe recibir de un solo almacén los productos para evitar que se generen congestiones. Por lo tanto, los valores binarios M_{jk} estarán limitados por el valor binario Y_k para cada albergue.

Restricción (8)

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} M_{jk} \leq Y_k, \quad \forall k \in K$$

Las ecuaciones (9) a (10) corresponden a las restricciones de no-negatividad y aquellas que especifican cuáles variables son enteras y cuáles binarias.

Restricción (9)

$$W_{gmk} \geq 0 \quad \textit{entera} \quad \forall g \in G, \quad m \in M, \quad k \in K$$
$$X_{jkl} \geq 0 \quad \forall j \in J, \quad k \in K, \quad l \in L$$

Restricción (10)

$$\varphi_j, Y_k, M_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \quad k \in K$$

El modelo se formuló en el lenguaje de modelado de IBM ILOG Optimization llamado OPL. En la sección 4.1 se muestra el código del modelo.

3.3. Descripción de escenarios

Los escenarios presentados están vinculados al grado de magnitud de los impactos perjudiciales ocasionados por tsunamis para lo cual se tomó como referencia el estudio de Jiménez et al. (2010) sobre el peligro de tsunamis en Lima y Callao con el apoyo de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) y la colaboración del CISMID.

3.3.1. Descripción del primer escenario

La causa de tsunami de este primer escenario es un terremoto hipotético de magnitud 8.5 Mw, con epicentro en el mar y relativamente próximo al litoral del Callao. Este escenario corresponde al terremoto más probable que podría ocurrir en Lima Metropolitana y Callao (Jiménez et al., 2010).

El SIRAD contiene información de los distritos y manzanas afectados por este escenario así como el número de personas afectadas según las zonas de inundación; esta información se detalla en la tabla 3.3. En total se identificó 34 zonas de inundación y la cantidad de afectados asciende a 89,972 personas (SIRAD, s.f.). Los distritos con mayor cantidad de afectados son Callao, Ventanilla y Chorrillos.

Por otra parte, los albergues potenciales deben estar operativos en este escenario propuesto por lo que se elegirán aquellos que no cuenten con peligro de inundación y que estén más próximos a las zonas de inundación. Además, cada albergue tiene una determinada capacidad de personas. El protocolo para instalación de albergues del INDECI (2006, p. 4) menciona que una comunidad de 500 personas debe tener entre 1.5 o 2 hectáreas de superficie como área de albergue. La tabla 3.4 muestra las capacidades de cada albergue habilitado que en total son 84.

$$\textit{Capacidad del albergue} = \textit{Superficie en } m^2 \times \frac{1 \textit{ ha}}{10,000 \textit{ m}^2} \times \frac{500 \textit{ personas}}{1.5 \textit{ ha}}$$

Tabla 3.3. Cantidad de personas afectadas según la zona de inundación

Zonas de inundación	Personas afectadas	Zonas de inundación	Personas afectadas
ANCÓN-1	1,016	LURÍN-4	1,827
CALLAO-1	5,867	LURÍN-5	366
CALLAO-2	719	PUCUSANA-1	795
CALLAO-3	597	PUNTA HERMOSA-1	79
CALLAO-4	10,297	PUNTA HERMOSA-2	298
CALLAO-5	11,594	PUNTA NEGRA-1	108
CALLAO-6	18,402	PUNTA NEGRA-2	197
CALLAO-7	17,204	PUNTA NEGRA-3	58
CHORRILLOS-1	50	SAN BARTOLO-1	161
CHORRILLOS-2	1,358	SANTA MARÍA DEL MAR-1	72
CHORRILLOS-3	2,312	SANTA ROSA-1	95
CHORRILLOS-4	1,111	VENTANILLA-1	5,014
LA PERLA-1	637	VENTANILLA-2	908
LA PUNTA-1	4,343	VILLA EL SALVADOR-1	231
LURÍN-1	480	VILLA EL SALVADOR-2	1,213
LURÍN-2	389	VILLA EL SALVADOR-3	547
LURÍN-3	829	VILLA EL SALVADOR-4	798
Total			89,972

Elaboración propia
Fuente: SIRAD (s.f.)

Tabla 3.4. Capacidad de los albergues

Albergue	Codificación	Superficie (m ²)	Capacidad de personas
1	ABG_001	28,908	964
2	ABG_002	129,809	4,327
3	ABG_003	32,645	1,088
4	ABG_004	22,675	756
5	ABG_005	32,122	1,071
6	ABG_006	28,198	940
⋮	⋮	⋮	⋮
81	ABG_211	83,440	2,781
82	ABG_212	50,040	1,668
83	ABG_213	86,660	2,889
84	ABG_214	115,889	3,863
Total			628,025

Elaboración propia⁵
Fuente: SIRAD (s.f.)

⁵ La tabla completa se encuentra en el CD que acompaña esta tesis.

Además, los almacenes seleccionados para alimentos fueron todos aquellos, que según el SIRAD, tienen poca probabilidad de inundación y que están próximos a los albergues. En total se seleccionaron 76 almacenes para alimentos. Luego, para cada almacén se calcula la capacidad de almacenamiento según el supuesto presentado que se detalla en la tabla 3.5.

$$\text{Capacidad del almacén} = \text{Superficie en m}^2 \times 3 \text{ m} \times 1\%$$

Tabla 3.5. Capacidad de almacenes

Almacén	Código almacén	Área total del almacén (m ²)	Superficie del almacén disponible (m ²)	Capacidad de almacén utilizable (m ³)
1	PT_LOG_004	870	-	10.44
2	PT_LOG_010	1,080	-	12.96
3	PT_LOG_011	60,000	-	720
4	PT_LOG_012	-	3,500	105
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
75	PT_LOG_175	1,890	-	22.68
76	PT_LOG_177	20,000	-	240
Total				56,744.85

Elaboración propia⁶

Fuente: SIRAD (s.f.)

Los productos de ayuda a trasladar son los alimentos que se necesitan en caso de emergencia. Con base en los requerimientos de calorías que una persona debe recibir por día (INDECI, 2013), se calculó el volumen de cada producto y la cantidad necesaria del producto que debe consumir la persona durante el periodo de emergencia. Se detalla en la tabla 3.6 los tipos de alimento, los empaques y los resultados de los cálculos.

Tabla 3.6. Bienes de ayuda humanitaria

Producto	Empaque	Periodo (días)	Volumen por empaque (cm ³)	Empaques necesarios para el periodo
Aceite vegetal	Botella de 1 litro	27	1,000	1.05
Anchoveta en aceite	1 lata de 120 g	27	172	16.07
Cereales (arroz)	Bolsa de 1 kg	27	1,389	8.10
Azúcar	Bolsa de 1 kg	27	1,053	1.08
Menestras (frejoles)	Bolsa de 1 kg	27	1,449	4.05
Raciones frías	1 lata de 10.5 onzas	3	3,780	9.00

Elaboración propia

Fuente: INDECI (2013)

⁶ La tabla completa se encuentra se encuentra en el CD que acompaña esta tesis.

Cabe mencionar que para el despacho de alimentos, las raciones frías se suministran por un periodo de 3 días (INDECI, 2013, p. 6) mientras que los demás tipos de alimentos se consideraron por un periodo de 27 días.

El objetivo de la presentación de este primer escenario es buscar una solución de evacuación de las personas afectadas hacia los albergues y cómo se van a abastecer mediante los almacenes.

3.3.2. Descripción del segundo escenario

Las características del desastre de este segundo escenario son similares al terremoto del año 1746 cuya magnitud fue 9.0 Mw con área de ruptura desde Chimbote (al norte de Lima) hasta el sur de Pisco. Es el peor escenario sísmico registrado que ha ocurrido en el Perú y se asume en esta investigación que nuevamente podría ocurrir.

El SIRAD también cuenta con información de los distritos afectados con este escenario, cuya población afectada será mayor que el primer escenario propuesto. A continuación se detalla en la tabla 3.7 las personas afectadas por zonas de inundación.

Tabla 3.7. Cantidad de personas afectadas según la zona inundación

Zonas de inundación	Personas afectadas	Zonas de inundación	Personas afectadas
ANCÓN-1	4,063	LURÍN-4	10,972
CALLAO-1	13,537	LURÍN-5	1,115
CALLAO-2	2,124	PUCUSANA-1	1,318
CALLAO-3	2,400	PUNTA HERMOSA-1	89
CALLAO-4	23,136	PUNTA HERMOSA-2	428
CALLAO-5	16,749	PUNTA NEGRA-1	108
CALLAO-6	40,038	PUNTA NEGRA-2	1,503
CALLAO-7	32,733	PUNTA NEGRA-3	139
CHORRILLOS-1	50	SAN BARTOLO-1	376
CHORRILLOS-2	10,410	SANTA MARÍA DEL MAR-1	80
CHORRILLOS-3	25,651	SANTA ROSA-1	122
CHORRILLOS-4	1,919	VENTANILLA-1	17,390
LA PERLA-1	5,085	VENTANILLA-2	2,730
LA PUNTA-1	4,343	VILLA EL SALVADOR-1	231
LURÍN-1	510	VILLA EL SALVADOR-2	1,213
LURÍN-2	743	VILLA EL SALVADOR-3	1,168
LURÍN-3	10,961	VILLA EL SALVADOR-4	798
Total			234,232

Elaboración propia
Fuente: SIRAD (s.f.)

Según la tabla 3.7, el total de afectados son 234,232 y los distritos con mayor número de afectados son Callao, Ventanilla y Chorrillos. Se observa el número de afectados aumenta en 160% comparando con el primer escenario.

Por otra parte, en este escenario se ven afectados ciertos albergues potenciales por causa del alcance del tsunami. En la tabla 3.8 se detalla los albergues que serían afectados en este escenario y que, por consiguiente, no pueden recibir personas afectadas.

Tabla 3.8. Albergues afectados por un tsunami de 9.0 Mw

Albergue	Codificación	Superficie (m ²)	Capacidad (personas)
1	ABG_013	27,995	933
2	ABG_030	25,014	834
3	ABG_048	139,209	4,640
4	ABG_046	83,628	2,788
5	ABG_081	43,178	1,439
6	ABG_082	487,620	16,254
7	ABG_148	104,986	3,500

Elaboración propia
Fuente: SIRAD (s.f.)

Este escenario también afecta a los almacenes que se encuentran cerca del área de inundación. En la tabla 3.9 se detalla los almacenes afectados.

Tabla 3.9. Almacenes afectados por un tsunami de 9.0 Mw

N°	Código almacén	Área total del almacén (m ²)	Superficie del almacén disponible (m ²)	Capacidad de almacén utilizable (m ³)
1	PT_LOG_021	96,000	-	1,152
2	PT_LOG_035	30,000	9,000	270
3	PT_LOG_050	75,800	35,000	1,050
4	PT_LOG_052	25,000	-	300
5	PT_LOG_081	4,750	-	57
6	PT_LOG_114	70,000	-	840
7	PT_LOG_115	80,000	-	960
8	PT_LOG_116	50,000	-	600
9	PT_LOG_142	62,000	-	744
10	PT_LOG_150	21,000	-	252
11	PT_LOG_152	6,700	-	80.4
12	PT_LOG_160	13,500	-	162
13	PT_LOG_163	82,000	-	984
14	PT_LOG_172	568,250	-	6,819

Elaboración propia
Fuente: SIRAD (s.f.)

Por último, los requerimientos alimenticios de la población afectada que se enviarán a cada albergue son los mismos que se mostraron en la tabla 3.6.

El objetivo de la presentación del segundo escenario, al igual que el primero, es buscar una solución de evacuación de las personas afectadas hacia los albergues y cómo se van a abastecer estos mediante los almacenes.



CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Este capítulo presenta la solución del modelo en los escenarios planteados, la discusión de los resultados y el diseño del plan de evacuación.

4.1. Resolución y análisis de resultados del primer escenario

Para el primer escenario se resuelve el problema de optimización lineal mixta formulado en la sección 3.2. El software para resolver este modelo es IBM ILOG CPLEX Optimization Studio versión 12.7.0.0 cuya función básica es la resolución de problemas de optimización utilizando el lenguaje de programación OPL.

El modelado en OPL se divide en dos partes: modelo con extensión *.mod* y datos con extensión *.dat*. En la primera parte, se codifica el modelo en el lenguaje de modelado de OPL. En la segunda, se codifica la importación de datos hacia el modelo matemático. A continuación se muestra el código (*.mod*) del modelo de programación lineal entera mixta formulado en el capítulo 3.

```

/*****
 * OPL 12.7.0.0 Model
 *****/
//Rangos
int g=...;
int j=...;
int k=...;
int l=...;
int m=...;
range zona_inundada=1..g;
range almacen=1..j;
range albergue=1..k;
range tipo_producto=1..l;
range tipo_vehiculo=1..m;

//Parámetros
float C[almacen, albergue]=...;
float K[almacen]=...;
float Q_1[zona_inundada,albergue]=...;
float Q[n in zona_inundada, p in albergue, s in tipo_vehiculo ]= Q_1[n,p];
float T_1[zona_inundada,albergue]=...;
float T[n in zona_inundada, p in albergue, s in tipo_vehiculo ]= T_1[n,p];
float alpha[tipo_producto]=...;
float S[albergue]=...;
float P[zona_inundada]=...;
float vol[tipo_producto]=...;
float u=...;

//Variables de decisión
dvar int+ W[zona_inundada][albergue][tipo_vehiculo];
dvar float+ X[almacen][albergue][tipo_producto];
dvar boolean Y[albergue];

```

```

dvar boolean varphi[almacen];
dvar boolean M[almacen][albergue];

//Expresiones
dexpr float Tiempo_Evacuacion_Total = sum(i in zona_inundada, j in
albergue, l in tipo_vehiculo) W[i][j][l]*T[i][j][l];
dexpr float Costo_Transporte = sum(i in almacen, j in albergue, l in
tipo_producto) vol[l]*C[i][j]*X[i][j][l]*450/(80*15);
dexpr float Albergues_Utilizados = sum(i in albergue) Y[i];
dexpr float Almacenes_Utilizados = sum(i in almacen) varphi[i];

//Funciones objetivos
minimize Tiempo_Evacuacion_Total;
minimize Costo_Transporte;

//Restricciones
subject to {

    Restriccion_1:
    forall(i in almacen)
        sum(j in albergue, l in tipo_producto) vol[l]*X[i][j][l] <=
            K[i]*varphi[i];

    Restriccion_2:
    forall(i in almacen)
        sum(j in albergue, l in tipo_producto) vol[l]*X[i][j][l] >=
            0.1*K[i]*varphi[i];

    Restriccion_3:
    forall(i in albergue)
        sum(j in zona_inundada, l in tipo_vehiculo) W[j][i][l] <=
            S[i]*Y[i];

    Restriccion_4:
    forall(i in albergue)
        sum(j in zona_inundada, l in tipo_vehiculo) W[j][i][l] >=
            0.1*S[i]*Y[i];

    Restriccion_5:
    forall(i in zona_inundada)
        sum(j in albergue, l in tipo_vehiculo) W[i][j][l] == P[i];

    Restriccion_6:
    forall(z in albergue, n in tipo_producto)
        sum(i in zona_inundada, j in tipo_vehiculo) W[i][z][j] ==
            alpha[n]*sum(o in almacen)X[o][z][n];

    Restriccion_7:
    forall(i in albergue)
        sum(j in almacen) M[j][i] <= Y[i];

    Restriccion_8:
    forall(i in almacen, j in albergue)
        sum(l in tipo_producto) X[i][j][l] <= M[i][j]*u;
}

```

También se detalla la estructura de datos y parámetros del modelo en el lenguaje OPL. El cuadro siguiente muestra el código (.dat) e importa los datos desde un archivo Excel.

```

/*****
 * OPL 12.7.0.0 Data
 *****/
//Rangos
g=34;
j=76;
k=84;
l=6;
m=1;

SheetConnection sismo_probable("Modelamiento_sismo_probable.xlsx");

//Datos de una dimensión

K from SheetRead(sismo_probable,"K");
alpha from SheetRead(sismo_probable,"alpha");
S from SheetRead(sismo_probable,"S");
P from SheetRead(sismo_probable,"P");
vol from SheetRead(sismo_probable,"vol");
u from SheetRead(sismo_probable,"u");

//Datos de dos dimensiones

C from SheetRead(sismo_probable,"C!B87:CG162");
Q_1 from SheetRead(sismo_probable,"Q!B44:CG77");
T_1 from SheetRead(sismo_probable,"T!B44:CG77");

```

Debido a que el modelo tiene dos funciones objetivo, se debe utilizar métodos de solución para problemas de optimización multiobjetivo. Para este escenario, se realiza tres pasos: normalizar las funciones objetivos, estandarizar el modelo según el método híbrido y realizar simulaciones para obtener los valores de la frontera de Pareto.

Primer paso: normalizar las funciones objetivo

La normalización consiste en transformar un conjunto de datos diferentes a una escala comparable. Existen diversos métodos de normalización; sin embargo, en esta investigación se utiliza la normalización denominada “0-1” para cada función objetivo con la expresión siguiente (Marler & Arora, 2004):

$$v_i = \frac{f_i - \min f_i}{\max f_i - \min f_i}$$

Donde f_i es la función objetivo i y v_i los valores normalizados $\in [0;1]$.

Para determinar los valores mínimos $\min f_i$ y máximos $\max f_i$ de la función objetivo f_i , se minimiza cada función por separado.

En primer lugar, se minimizó el tiempo de evacuación de las personas hacia las zonas más seguras obteniendo el valor de 5,271,359 minutos y el máximo valor del costo de transporte es S/. 35,060. Luego, se minimizó el costo de transporte de los productos de ayuda humanitaria y el valor es S/.7,534 y el máximo valor del tiempo de evacuación es 5,293,613 minutos. Es importante aclarar que las dos cifras de tiempo indicadas corresponden al acumulado del tiempo de evacuación de cada una de las personas. La tabla 4.1.1 resume los resultados obtenidos.

Tabla 4.1.1. Tabla de resultados de corrida

Minimizar f_i	Tiempo de corrida (segundos)	Tiempo de evacuación (minutos)	Costo de transporte (S/.)
Tiempo de evacuación	106.98	5,271,359	35,060
Costo de transporte	638.02	5,293,613	7,534

Elaboración propia

Conocidos los valores mínimos y máximos, se efectúa la normalización de las funciones objetivos. El intervalo será de 0 hasta 10^6 unidades y luego se multiplica el valor normalizado por el coeficiente 10^6 para tener dicho intervalo.

$$v_1 = \frac{f_1 - 5271359.65}{5293613.61 - 5271359.65} * 10^6 = \frac{f_1 - 5271359.65}{0.02225}$$

$$v_2 = \frac{f_2 - 7534.26}{35060.28 - 7534.26} * 10^6 = \frac{f_2 - 7534.26}{0.02753}$$

Segundo paso: estandarizar según el método híbrido

Se aplica el método híbrido utilizando los valores de las funciones objetivos normalizadas en el paso anterior ($f_i^* = v_i(f_i)$). Este método usa la combinación de dos métodos de estandarización (suma de pesos y épsilon restricción) con el fin de generar mayor número de soluciones factibles y óptimas (Takahashi, 2007). Se genera una sola función objetivo a partir de varias funciones objetivos y se agrega un grupo de restricciones como se muestra a continuación.

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x)$$

sujeto a: $\{f_j(x) \leq \epsilon_j, j = 1, \dots, n (j \neq i)\}$

$$x \in \Omega, \Omega \in \mathbb{R}^n$$

El método de ponderación utilizado en el método híbrido asegura que el modelo genere soluciones óptimas que pertenezcan a la frontera de Pareto (Takahashi, 2007). Además, los pesos w_i de las funciones objetivos deben ser positivos y su suma igual a uno para generar la mayor cantidad de soluciones. Como propuesta, los valores de los pesos w_i para cada simulación se calculan con una distribución uniforme y se calculan los pares $(w_1^i; w_2^i)$ hasta conseguir el número de soluciones necesarias. Para este caso, se utilizaron 26 valores de pesos diferentes ($n = 26$).

$$w_1^i = 1 - \frac{i-1}{n-1} ; w_2^i = 1 - w_1^i \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Seguidamente, la función objetivo “tiempo de evacuación de personas” (f_1) se acota como lo indica el método de la siguiente manera:

$$f_1(x) \leq \epsilon_i$$

Luego como propuesta, los valores de épsilon ϵ_i para cada simulación se calculan a partir de una distribución uniforme como se describe a continuación:

$$\epsilon_i = \text{Max}(f_1) - \frac{\text{Max}(f_1) - \text{Min}(f_1)}{n-1} * (i-1) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Como $w_1^i = 1 - \frac{i-1}{n-1}$, reemplazando en w_2^i tenemos $w_2^i = \frac{i-1}{n-1}$ y reemplazando en ϵ_i :

$$\epsilon_i = \text{Max}(f_1) - (\text{Max}(f_1) - \text{Min}(f_1))w_2^i \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Tercer paso: realizar simulaciones

Se procede a estandarizar el modelo con el método híbrido utilizando CPLEX. Se agrega el siguiente código al modelo (.mod):

```
//Parámetros adicionales método híbrido
float iteration=...;
float w1= 1-0.04*(iteration-1);
float w2= 1-w1;
float epsilon= 5293613.61 - (5293613.61-5271359) * w2;

//Función objetivo normalizada híbrida
minimize (Tiempo_Evacuacion_Total - 5271359.65)/0.02225 * w2 +
(Costo_Transporte - 7534.26)/0.02753 * w1;

//Restricciones
subject to {

    Ecuacion_Metodo_Hibrido:
    Tiempo_Evacuacion_Total <= epsilon;
```

Luego, se agrega el código del recuadro anterior al programa elaborado al inicio de la sección 4.1 y se corre 26 veces modificando el parámetro “*iteration*” utilizando CPLEX en un computador con procesador Intel Core i5-4200U CPU 1.60 GHz. Cada simulación tiene un total de 7,327 restricciones, 47,704 variables de decisión compuestas por 6,544 binarias, 2,856 enteras y 38,304 variables positivas. Los resultados de cada simulación se muestran en la tabla 4.1.2 que incluye también los resultados de la cantidad de albergues y almacenes.

Tabla 4.1.2. Tabla de resultados de las simulaciones del primer escenario⁷

<i>i</i>	w_1^i	w_2^i	ϵ_i	Tiempo de corrida (s)	Tiempo de evacuación (minutos)	Costo de transporte (S/.)	Almacenes	Albergues
1	1	0	5,293,613.61	638	5,293,613.61	7,534.26	27	46
2	0.96	0.04	5,292,723.45	1,380	5,292,723.26	7,542.19	27	46
3	0.92	0.08	5,291,833.29	419	5,283,892.30	7,643.29	26	45
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6	0.8	0.2	5,289,162.82	403	5,282,239.93	7,694.61	26	44
7	0.76	0.24	5,288,272.66	1,486	5,274,601.39	8,014.11	26	45
8	0.72	0.28	5,287,382.50	745	5,273,821.73	8,053.84	26	45
9	0.68	0.32	5,286,492.34	1,374	5,271,508.61	8,183.86	26	45
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	0.44	0.56	5,281,151.39	316	5,271,359.65	8,207.62	26	45
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	0.04	0.96	5,272,249.81	196	5,271,359.65	8,207.62	26	45
26	0	1	5,271,359.65	106	5,271,359.65	35,060.28	24	45

Elaboración propia

Con los resultados mostrados en la tabla 4.1.2, se genera la frontera de Pareto con todos los pares no dominados. Pese a que se simuló 26 veces, algunas de estas simulaciones resultaron ser puntos dominados parcialmente y algunas eran soluciones repetidas. En el gráfico 4.1.1 se muestra las soluciones encontradas que forman la frontera de Pareto. En total se generó ocho soluciones no dominadas.

Luego de determinar el conjunto de soluciones que forman la curva de Pareto (gráfico 4.1.1) se ordena las soluciones de mayor relevancia y se aplica el método ELECTRE I. Los criterios de los pesos por cada rubro se muestran en la tabla 4.1.3, así como la matriz homogeneizada de clasificaciones. Se dio prioridad al tiempo de evacuación por encima de los costos ya que Marianov & ReVelle (1995) afirman que en el caso de ayuda humanitaria uno de los objetivos importantes es el tiempo de respuesta.

⁷ La tabla completa se encuentra en el CD que acompaña esta tesis.

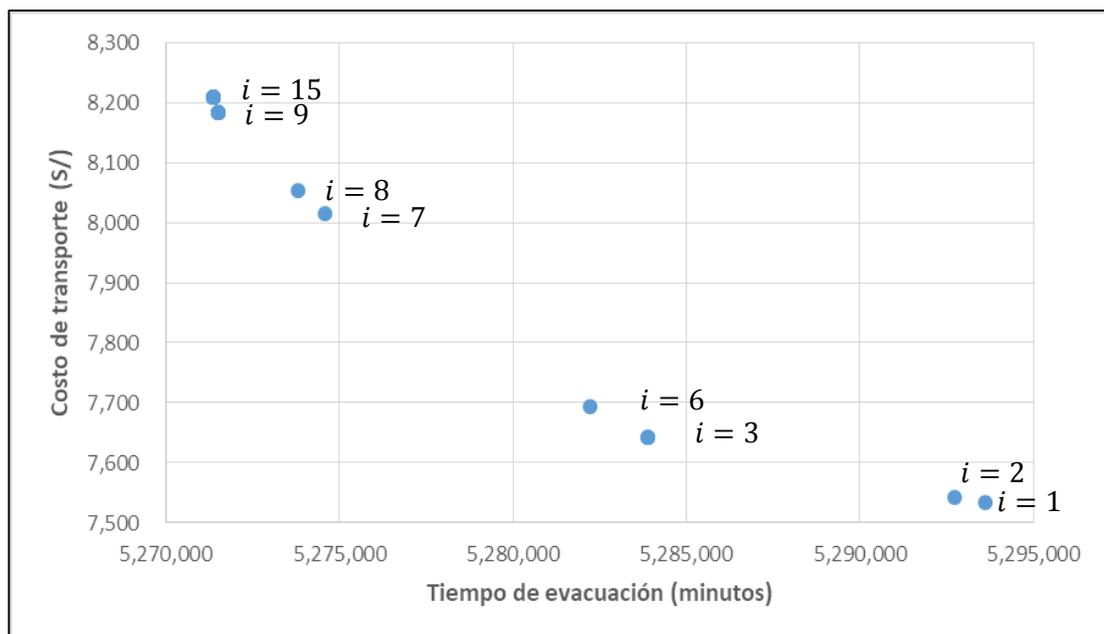


Gráfico 4.1.1. Frontera de Pareto para el problema de inundación.
Primer escenario
Elaboración propia

Tabla 4.1.3. Matriz homogeneizada de clasificaciones. Primer escenario

Tabla normalizada [0;100]				
Alternativa	Tiempo de evacuación (minutos)	Costo de transporte (S/.)	Almacenes utilizados	Albergues utilizados
A ₁ (i = 1)	0.00	100.00	0	0
A ₂ (i = 2)	4.00	98.82	0	0
A ₃ (i = 3)	43.68	83.81	100	50
A ₄ (i = 6)	51.11	76.19	100	100
A ₅ (i = 7)	85.43	28.74	100	50
A ₆ (i = 8)	88.94	22.84	100	50
A ₇ (i = 9)	99.33	3.53	100	50
A ₈ (i = 15)	100.00	0.00	100	50
Pesos	60	30	5	5

A: alternativa

Elaboración propia

Con todos los datos homogeneizados, se emplea el algoritmo ELECTRE I explicado en el capítulo 1 de acuerdo con Jaimes, Sandoval & Torres (1992). En primer lugar, se calcula las matrices de concordancia y discordancia para conocer las dominancias que hay entre las alternativas. En la tabla 4.1.4 se muestra las matrices con sus respectivos parámetros.

Tabla 4.1.4. Matrices de concordancia y discordancia. Primer escenario

Matriz de concordancia (p =40)									Matriz de discordancia (q =60)								
A	1	2	3	4	5	6	7	8	A	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	1	0.0	4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	60.0	0.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	2	1.2	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3	70.0	70.0	0.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	3	16.2	15.0	0.0	50.0	41.7	45.3	55.6	56.3
4	70.0	70.0	65.0	0.0	35.0	35.0	35.0	35.0	4	23.8	22.6	7.6	0.0	34.3	37.8	48.2	48.9
5	70.0	70.0	60.0	60.0	0.0	30.0	30.0	30.0	5	71.3	70.1	55.1	50.0	0.0	3.5	13.9	14.6
6	70.0	70.0	60.0	60.0	60.0	0.0	30.0	30.0	6	77.2	76.0	61.0	53.3	5.9	0.0	10.4	11.1
7	70.0	70.0	60.0	60.0	60.0	60.0	0.0	30.0	7	96.5	95.3	80.3	72.7	25.2	19.3	0.0	0.7
8	70.0	70.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	0.0	8	100.0	98.8	83.8	76.2	28.7	22.8	3.5	0.0

A: alternativa

Elaboración propia

Seguidamente, se determina las alternativas dominadas y las alternativas que son dominadas por otras utilizando los parámetros $p = 40$ y $q = 60$. En la tabla 4.1.5 se detalla la relación de dominancia entre las alternativas.

Tabla 4.1.5. Matrices de dominancia de alternativas. Primer escenario

A	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	1
3	1	1	0	0	0	0	0	0	2
4	1	1	1	0	0	0	0	0	3
5	0	0	1	1	0	0	0	0	2
6	0	0	0	1	1	0	0	0	2
7	0	0	0	0	1	1	0	0	2
8	0	0	0	0	1	1	1	0	3
	3	2	2	2	3	2	1	0	
	Son dominados								

A: alternativa

Elaboración propia

Por último, se construye la jerarquización que consiste en ubicar en primer lugar la alternativa que no es dominada por otra. Para determinar el segundo lugar, se elimina la alternativa ya escogida y se vuelve a observar qué alternativa no es dominada por otra. Este procedimiento se repite hasta obtener el orden de todas las alternativas.

En la tabla 4.1.6, se muestra el orden de relevancia de las alternativas siguiendo el algoritmo ELECTRE I para el primer escenario propuesto. Se observa que la alternativa 8 es la mejor en comparación con las demás empleado y se elige esta como solución. A continuación se analiza los resultados con base en esta opción.

Finalmente, las evidencias mostradas sugieren que las inundaciones son desastres naturales con elevada frecuencia, y también en términos relativos, de elevados impactos tanto en víctimas como en costos directos.

Tabla 4.1.6. Ranking de mejores alternativas. Primer escenario

Orden	Alternativa
1	A ₈
2	A ₇
3	A ₆
4	A ₅
5	A ₄
6	A ₃
7	A ₂
8	A ₁

Elaboración propia

La alternativa 8 representa la iteración número 15 del modelo del primer escenario cuyo tiempo total de evacuación de las personas es 5,271,359 minutos, el costo de transporte es S/.8,207 y la cantidad de almacenes y albergues utilizados es 26 y 45, respectivamente. Además, el tiempo de evacuación promedio por persona de esta solución es 58.58 minutos.

El gráfico 4.1.2 presenta la evacuación de las personas desde las zonas inundadas hasta los albergues. En total, se utiliza 45 albergues potenciales para trasladar a 89,972 personas afectadas.

		Albergues								Personas evacuadas
		ABG_001	ABG_002	ABG_003	ABG_004	ABG_005	ABG_006	...	ABG_214	
Zonas Inundadas	ANCÓN-1	0	0	0	0	0	0	...	0	1,016
	CALLAO-1	0	3,608	0	0	0	0	...	0	5,867
	CALLAO-2	0	719	0	0	0	0	...	0	719
	CALLAO-3	0	0	0	0	0	0	...	0	597
	CALLAO-4	0	0	1,088	756	0	0	...	0	10,297
	CALLAO-5	964	0	0	0	1,071	0	...	0	11,594
	CALLAO-6	0	0	0	0	0	0	...	0	18,402
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
	VES-4	0	0	0	0	0	0	...	0	798
	Personas recibidas	964	4,327	1,088	756	1,071	0	...	0	89,972

Gráfico 4.1.2. Tabla de asignación de afectados desde las zonas inundadas hacia los albergues. Resultados del primer escenario⁸
Elaboración propia

⁸ La tabla completa se encuentra en el CD que acompaña esta tesis.

Por otro lado, una de las variables de decisión es la cantidad de ayuda que se movilizan desde los almacenes hacia los albergues. Son seis los productos (consulte la tabla 3.6) de ayuda que tienen un volumen específico por cada producto. La suma de los volúmenes de la ayuda enviada se muestra en el gráfico 4.1.3. En total, se traslada 5,046.18 m³ de productos de ayuda humanitaria utilizando 26 almacenes.

		Albergues								Ayuda por enviar
		ABG_001	ABG_002	ABG_003	ABG_004	ABG_005	ABG_006	...	ABG_214	
Almacenes	PT_LOG_004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	PT_LOG_010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	PT_LOG_011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	PT_LOG_012	0.00	0.00	0.00	42.40	0.00	0.00	...	0.00	42.40
	PT_LOG_015	54.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	54.07
	PT_LOG_016	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	PT_LOG_017	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	PT_LOG_018	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	105.83
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	PT_LOG_177	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	228.10
Ayuda solicitada		54.07	242.68	61.02	42.40	60.07	0.00	...	0.00	5,046.18

Gráfico 4.1.3. Tabla de asignación de ayuda humanitaria desde los almacenes hacia los albergues en m3. Resultados del primer escenario⁹
Elaboración propia

4.2. Resolución y análisis de resultados del segundo escenario

Al igual que en el primer escenario, se emplea el software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio versión 12.7.0.0 para la resolución de este escenario.

El código del modelo (.mod) es el mismo programa inicial del primer escenario con la excepción de que algunos albergues y almacenes serían afectados por el tsunami provocado por el terremoto como ilustra las tablas 3.8 y 3.9. En el código se agregó las restricciones que aseguran que el modelo no asigne los albergues y almacenes indicados en esas tablas.

```
subject to {

    Albergues_inhabilitados:
    Y[13] == 0 ;
    Y[27] == 0 ;
    Y[29] == 0 ;
    Y[32] == 0 ;
    Y[43] == 0 ;
    Y[44] == 0 ;
    Y[68] == 0 ;

    Almacenes_inhabilitados:
    varphi[10] == 0;
```

⁹ Ídem

```

varphi[16] == 0;
varphi[29] == 0;
varphi[30] == 0;
varphi[37] == 0;
varphi[51] == 0;
varphi[52] == 0;
varphi[53] == 0;
varphi[62] == 0;
varphi[68] == 0;
varphi[69] == 0;
varphi[72] == 0;
varphi[73] == 0;
varphi[74] == 0;
}

```

Con respecto a los datos (.dat), el código es el mismo e importa los datos desde un archivo Excel modificado con todas las consideraciones del segundo escenario.

Debido a que el modelo tiene dos funciones objetivos, se debe utilizar métodos de solución para problemas de optimización multiobjetivo. Para este escenario se realiza dos pasos: estandarizar el modelo utilizando el método de restricciones modificado para mejorar el comportamiento computacional, y realizar simulaciones para obtener los valores de la frontera de Pareto.

Primer paso: estandarizar el modelo

Se estima que el modelo matemático de este escenario tiene complejidad computacional porque se realizó muchas pruebas con el método híbrido (aplicado en el primer escenario) pero no se encontró soluciones factibles durante la optimización por un periodo de 2 horas. Por tal motivo, se aplica el método de restricciones modificado ya que permite tener un mejor rendimiento computacional. Este método relaja las restricciones $f_j(x) \leq \epsilon_j$ permitiéndoles ser compensadas y, a su vez, penalizar esa compensación en la función objetivo (Ehrgott & Ruzika, 2008). Con este método, se genera una sola función objetivo y se debe de agregar un grupo de restricciones como se muestra a continuación:

$$\min f(x) = f_k(x) + \sum_{i=1}^n u_i s_i$$

$$\text{sujeto a: } \begin{cases} f_j(x) - s_i \sigma_i \leq \epsilon_j, j = 1, \dots, n (i \neq k) \\ x \in \Omega, \Omega \in \mathbb{R}^n, s_i \geq 0 \end{cases}$$

El índice k representa la función objetivo a minimizar, $u_i \geq 0$ representa una constante que le da un peso a cada función objetivo restringida, σ_i es una constante que toma valor fijo de 0.375 y s_i es una variable de decisión que se agrega al modelo matemático.

Aplicando este método, se escoge el “tiempo de evacuación” como función objetivo a minimizar (f_1). Luego, el costo de transporte será considerado como restricción. Como propuesta, la constante u_i se define de la siguiente manera para cada simulación ($n = 26$):

$$u_i = 50 + \frac{100}{n-1} * (i-1) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Para el caso de la restricción del costo de transporte, se debe calcular los valores máximos y mínimos de esa función. En este caso, el mínimo valor del costo de transporte es S/.81350 y el máximo valor es S/.95488. Una vez identificados estos valores, se define el lado derecho de la restricción (ϵ_i) para cada simulación ($n = 26$) utilizando una distribución uniforme como se propone a continuación:

$$\epsilon_i = \text{Max}(f_1) - \frac{\text{Max}(f_1) - \text{Min}(f_1)}{n-1} * (i-1) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Segundo paso: realizar simulaciones

Se estandariza el modelo con el método de restricciones mejorado utilizando CPLEX. Se agrega el siguiente código al modelo (.mod).

```
//Parámetros adicionales por el método de restricciones modificado
float iteration=...;
float mu = 50 + 4*(iteration-1);
float epsilon= 95488.1 - 565.491*(iteration-1);
//Variables de decisión adicionales por el método de restricciones
modificado
dvar float+ Spositivo;
//Función objetivo con método de restricciones modificado
minimize Tiempo_Evacuacion_Total+mu*Spositivo;
//Restricciones
subject to {
    Ecuacion_Metodo_Restricciones_Mejorado:
    Distancia_por_Volumen-Spositivo*0.375 <= epsilon;
}
```

Luego, se agrega el código del recuadro anterior al programa inicial y se corre 26 veces modificando el parámetro “iteration” utilizando CPLEX en un computador con procesador Intel Core i5-4200U CPU 1.60 GHz. Cada simulación tiene un total de 7348 restricciones, 47705 variables de decisión compuestas por 6544 binarias, 2856 enteras y 38305 variables positivas.

Cabe mencionar que en este escenario, cada simulación en CPLEX resultó muy complicada porque no se encontró el valor óptimo en 3 horas de corrida, incluso en algunos casos no se encontró resultados factibles. Por tal motivo, se añadió una regla que permite buscar soluciones óptimas hasta un máximo de 2 horas. Como consecuencia, los resultados obtenidos tal vez sean óptimos, pero se asumirá que los resultados son cercanos al óptimo¹⁰ ya que el ratio entre el mejor óptimo entero actual con el mejor óptimo del nodo no supera el 7% (*MIP gap*). Los resultados de cada simulación se muestran en la tabla 4.2.1 que incluye también los resultados de la cantidad de albergues y almacenes.

Tabla 4.2.1. Tabla de resultados de las simulaciones del segundo escenario¹¹

i	u_i	ϵ_i	Tiempo de corrida (s)	Tiempo de evacuación (minutos)	Costo de transporte (S/.)	Almacenes	Albergues
1	50	95,488.10	577.53	30,171,899	95,484	30	55
2	54	94,922.61	234.05	30,172,950	95,022	35	57
3	58	94,357.12	2,053.49	30,173,973	94,407	30	55
4	62	93,791.63	3,748.49	30,173,078	93,664	32	56
5	66	93,226.14	2,500.24	30,172,292	92,874	32	55
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	146	81,916.32	7,200.36	31,624,063	81,995	43	70
26	150	81,350.83	-	No encontrado			

Elaboración propia

Con los resultados mostrados en la tabla 4.2.1, se genera la frontera de Pareto (gráfico 4.2.1) con todos los pares no dominados. Pese a que se simuló 26 veces, algunas de estas simulaciones resultaron ser puntos dominados debido a que muchas de ellas no son soluciones óptimas. En total, se generó 15 alternativas.

Homogeneizados los datos, se calcula las matrices de concordancia y discordancia con el objetivo de conocer las dominancias que hay entre las alternativas. En la tabla 4.2.3 se muestra la matriz de concordancia y en la tabla 4.2.4 la matriz de discordancia de las 15 alternativas.

¹⁰ Una forma de abordar la complejidad computacional es con metaheurísticas pero está fuera del alcance de esta tesis.

¹¹ La tabla completa se encuentra en el CD que acompaña esta tesis.

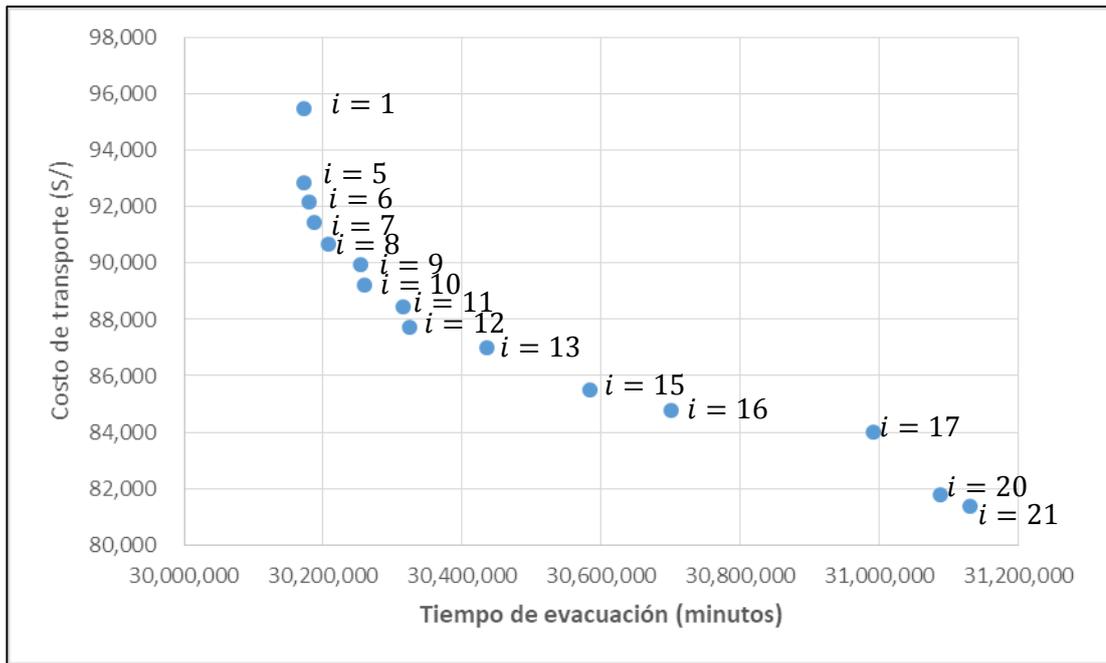


Gráfico 4.2.1. Frontera de Pareto para el problema de inundación.
Segundo escenario
Elaboración propia

Seguidamente, se determina las alternativas dominadas y las alternativas que son dominadas por otras utilizando los parámetros $p = 40$ y $q = 60$. En la tabla 4.2.5 se detalla la relación de dominancia entre las alternativas.

Tabla 4.2.3. Matriz de concordancia. Segundo escenario

Matriz de concordancia (p=40)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	65	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
2	30	0	70	70	65	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
3	30	30	0	60	60	60	70	65	70	70	70	70	70	70	70
4	30	30	35	0	60	60	70	70	70	70	70	70	70	70	70
5	30	30	40	40	0	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
6	30	30	35	30	30	0	70	70	70	70	70	70	70	70	70
7	30	30	30	30	30	30	0	65	65	65	70	65	65	70	70
8	30	30	30	30	30	30	35	0	70	70	70	65	70	70	70
9	30	30	30	30	30	30	30	30	0	65	70	60	65	70	70
10	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	70	60	65	65	70
11	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	60	60	60	60
12	30	30	30	30	30	30	35	30	40	40	40	0	65	70	70
13	30	30	30	30	30	30	35	30	35	35	35	30	0	65	65
14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	40	30	35	0	70
15	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	40	30	35	30	0

A: alternativa

Elaboración propia

Tabla 4.2.4. Matriz de discordancia. Segundo escenario

Matriz de discordancia (q =60)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	18	23	29	34	39	44	50	55	60	71	76	81	97	100
2	14	0	5	10	15	21	26	31	36	42	52	57	63	78	82
3	43	29	0	7	29	16	21	26	31	37	47	52	58	73	77
4	36	29	1	0	21	10	16	21	26	31	42	47	52	68	71
5	14	14	3	2	0	5	10	16	21	26	37	42	47	63	66
6	36	29	8	7	21	0	5	10	16	21	31	37	42	58	61
7	64	50	21	29	50	29	0	21	10	16	26	31	37	52	56
8	57	57	29	29	43	29	14	0	5	10	21	26	31	47	50
9	64	64	36	36	50	36	21	21	0	5	16	21	26	42	45
10	86	86	57	57	71	57	43	29	21	0	10	29	21	37	40
11	100	100	71	71	86	71	57	57	36	36	0	43	43	26	29
12	57	57	54	54	52	47	46	40	39	28	12	0	5	21	24
13	100	100	85	84	86	77	77	71	70	58	43	43	0	16	19
14	96	96	95	94	92	87	87	81	80	68	53	40	29	0	3
15	100	100	99	98	96	92	91	85	84	72	57	45	36	7	0

A: alternativa

Elaboración propia

Tabla 4.2.5. Matrices de dominancia de alternativas. Segundo escenario

A	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	1
3	1	1	0	0	0	0	0	0	2
4	1	1	1	0	0	0	0	0	3
5	0	0	1	1	0	0	0	0	2
6	0	0	0	1	1	0	0	0	2
7	0	0	0	0	1	1	0	0	2
8	0	0	0	0	1	1	1	0	3
	3	2	2	2	3	2	1	0	

A: alternativa

Elaboración propia

La tabla 4.2.6 muestra el orden de relevancia de las alternativas siguiendo el algoritmo ELECTRE I para el segundo escenario propuesto. Se observa que la alternativa 1 es la alternativa que mejor domina mejor frente a las demás alternativas.

Se escoge la alternativa 1 como solución y se analizará los resultados con base en esta opción. Cabe señalar que la alternativa 1 representa la primera iteración del modelo del segundo escenario. Como resultado de esta iteración, el tiempo total de evacuación de las personas es 30,171,899 minutos, el costo de transporte es S/.95,483 y la cantidad de almacenes y albergues utilizados es 30 y 55, respectivamente. Además, el tiempo de evacuación promedio por persona de esta solución es 128.81 minutos. Es importante aclarar que las dos cifras de tiempo

indicadas corresponden al acumulado del tiempo de evacuación de cada una de las personas.

Tabla 4.2.6. Ranking de mejores alternativas. Segundo escenario

Orden	Alternativas	Orden	Alternativas
1	A ₁	8	A ₈
2	A ₂	9	A ₉
3	A ₃	10	A ₁₀
4	A ₅	11	A ₁₂
5	A ₄	12	A ₁₃
6	A ₆	13	A ₁₄
7	A ₇	14	A ₁₅
		15	A ₁₁

Elaboración propia

El gráfico 4.2.2 presenta la evacuación de las personas desde las zonas inundadas hasta los albergues. En total, se utiliza 55 albergues potenciales para trasladar a 234,232 personas afectadas.

		Albergues								Personas evacuadas
		ABG_001	ABG_002	ABG_003	ABG_004	ABG_005	ABG_006	...	ABG_214	
Zonas Inundadas	ANCÓN-1	0	0	0	0	0	0	...	0	4,063
	CALLAO-1	0	0	0	0	0	0	...	0	13,537
	CALLAO-2	0	0	0	0	0	0	...	0	2,124
	CALLAO-3	0	2,400	0	0	0	0	...	0	2,400
	CALLAO-4	0	1,927	1,088	0	0	0	...	0	23,136
	CALLAO-5	964	0	0	756	1,071	940	...	0	16,749
	CALLAO-6	0	0	0	0	0	0	...	0	40,038
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
	VES-4	0	0	0	0	0	0	...	0	798
Personas recibidas	964	4,327	1,088	756	1,071	940	...	0	234,232	

Gráfico 4.2.2. Tabla de asignación de afectados desde las zonas inundadas hacia los albergues. Resultados del segundo escenario¹²
Elaboración propia

Por otra parte, la suma de los volúmenes de la ayuda enviada se muestra en el gráfico 4.2.3. En total se trasladan 13,137.17 m³ de productos de ayuda humanitaria utilizando 30 almacenes.

¹² La tabla completa se encuentra en el CD que acompaña esta tesis.

		Albergues								Ayuda por enviar
		ABG_001	ABG_002	ABG_003	ABG_004	ABG_005	ABG_006	...	ABG_214	
Almacenes	PT_LOG_004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	PT_LOG_010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	PT_LOG_011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.72	...	0.00	516.16
	PT_LOG_012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	46.10
	PT_LOG_015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	41.11
	PT_LOG_016	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	PT_LOG_017	0.00	0.00	0.00	0.00	60.07	0.00	...	0.00	60.07
	PT_LOG_018	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00
	:	:	:	:	:	:	:	...	:	:
	PT_LOG_177	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00	226.31
Ayuda solicitada	54.07	242.68	61.02	42.40	60.07	52.72	...	0.00	13,137.17	

Gráfico 4.2.3. Tabla de asignación de ayuda humanitaria desde los almacenes hacia los albergues en m3. Resultados del segundo escenario¹³
Elaboración propia

4.3. Comparación de escenarios

Ambos escenarios se presentan en condiciones diferentes, por lo que es necesario conocer el grado de impacto y la relación que existe entre ambos.

El gráfico 4.3.1 revela que en el segundo escenario los distritos en donde aumenta la cantidad de afectados son Callao, Chorrillos, Lurín y Ventanilla. Asimismo, en total la cantidad de personas afectadas aumenta significativamente en 160% en contraste con el primer escenario.

Con respecto al tiempo de evacuación, en el primer escenario cada persona evacúa las áreas inundadas en 58.58 minutos en promedio, mientras que el segundo escenario aumenta en un 120% con una media de 128.81 minutos cada uno.

En el caso de la evacuación, se busca que las personas lo realicen en el menor tiempo posible. En el gráfico 4.3.2, se muestra la cantidad de tiempo que los afectados deben caminar para llegar hacia sus albergues asignados en el primer escenario. El tiempo promedio de llegada de la ola (producto del tsunami propuesto) a la costa es de 20 minutos (PREDES, 2009). Las personas que se desplazan más de 20 minutos suman 86,366 y representan el 96% de la población afectada.

Por otra parte en el segundo escenario, el gráfico 4.3.3 muestra la cantidad de tiempo que los afectados deben caminar para llegar hacia sus albergues asignados. Son 232,781 personas que se desplazan en más de 20 minutos, y representan el 99% de la población afectada.

¹³ Ídem.

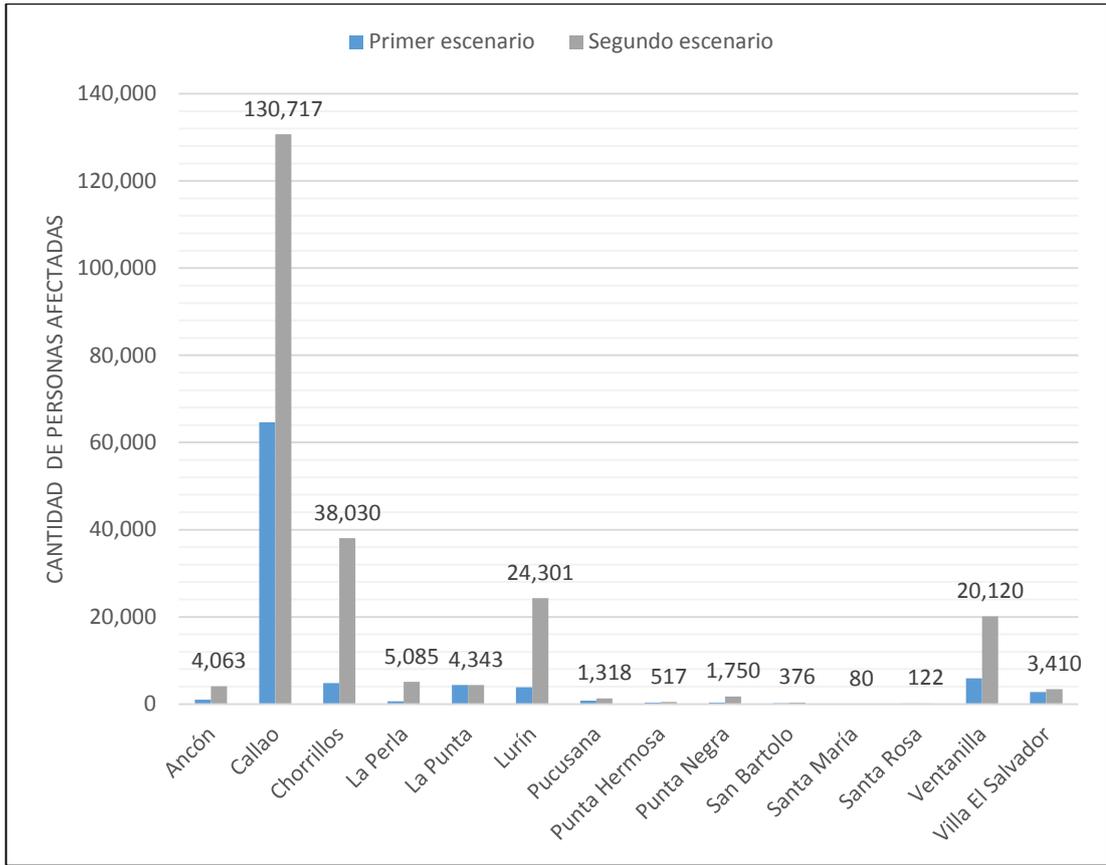


Gráfico 4.3.1. Número de personas afectadas por distrito
Elaboración propia

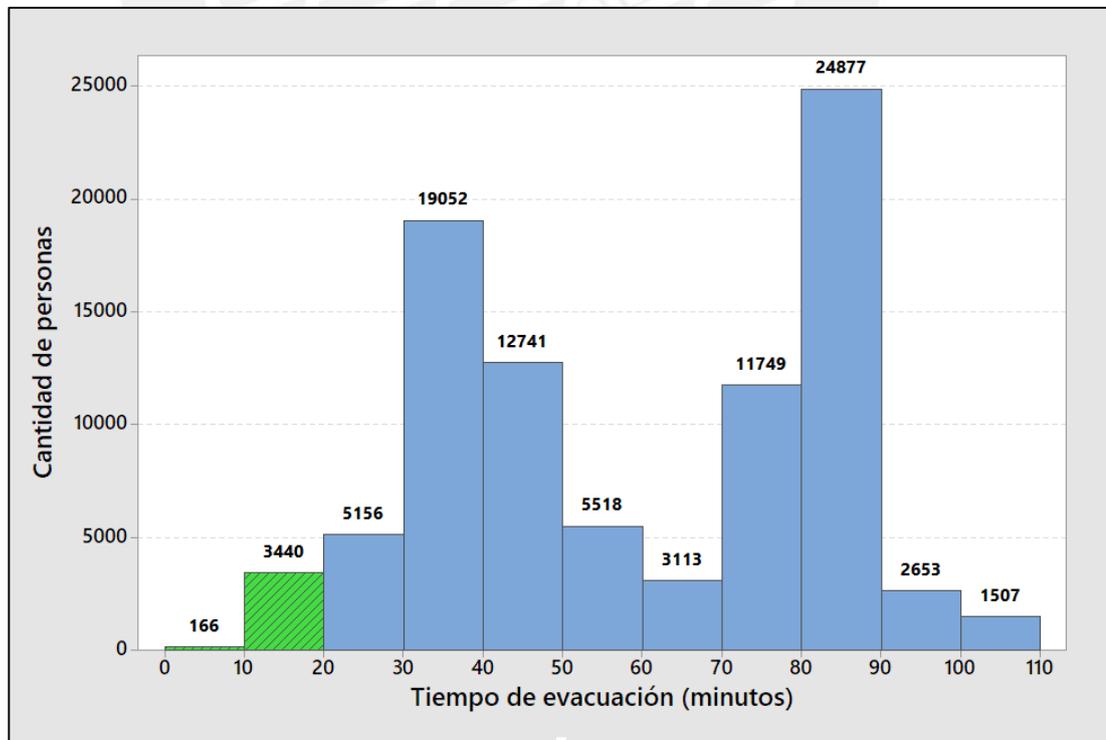


Gráfico 4.3.2. Histograma de tiempo de evacuación del primer escenario
Elaboración propia. Minitab

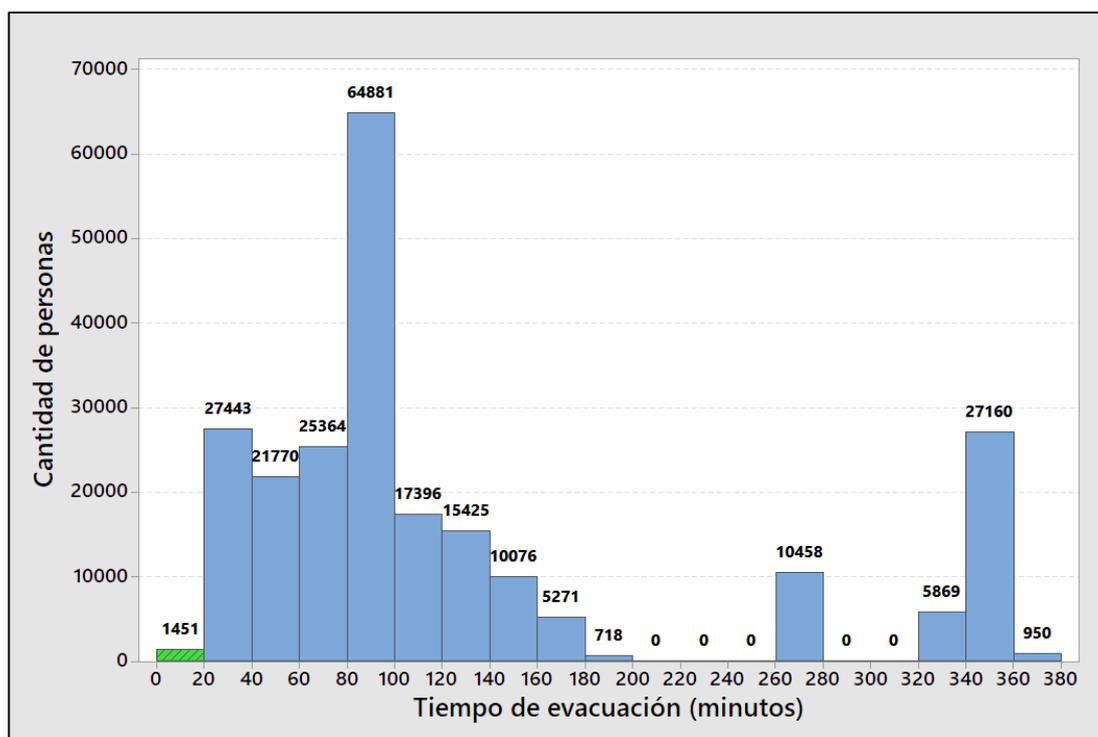


Gráfico 4.3.3. Histograma de tiempo de evacuación del segundo escenario
Elaboración propia. Minitab

El análisis de los resultados también revela los distritos con mayor cantidad de personas que evacúan por más de 20 minutos. Esas cifras se ilustran en el gráfico 4.3.4 organizadas por distritos en donde residen los afectados. Así, a pesar de que los modelos matemáticos minimizaron el tiempo de evacuación, aún se observa una cantidad apreciable de personas afectadas en los distritos del Callao, Chorrillos, Lurín y Ventanilla que deben caminar más de 20 minutos para evacuar las áreas inundadas. En términos porcentuales, en el primer escenario la proporción de afectados (respecto del total de afectados) que caminan más de 20 minutos son 99%, 100% y 79% para los distritos de Callao, Ventanilla y Chorrillos, respectivamente. En el segundo escenario, esos porcentajes son 100%, 98% y 100% para los distritos de Callao, Chorrillos y Lurín, respectivamente.

Una de las causas de que la evacuación tome mucho tiempo es que los albergues de los distritos cercanos a las zonas inundadas ocupan el máximo de su capacidad, por lo tanto, las personas deben desplazarse hacia otros distritos más distanciados. En el gráfico 4.3.5, se observa el porcentaje de utilización de cada distrito para los dos escenarios propuestos. Los distritos de San Miguel, La Perla, Bellavista y Barranco utilizan el 100% de su capacidad en ambos escenarios. En el segundo escenario, los distritos del Callao, San Martín de Porres, Cercado de Lima, Ventanilla, Punta Hermosa, Chorrillos y Punta Negra también utilizan el 100% de su capacidad.

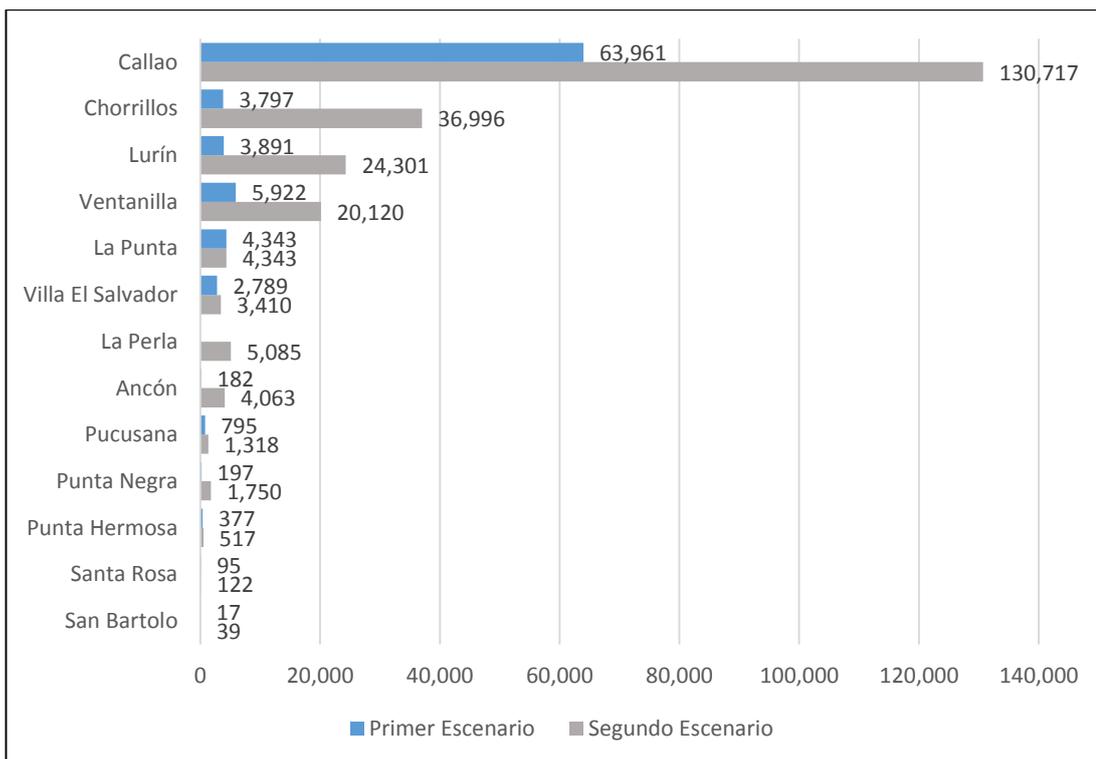


Gráfico 4.3.4. Personas que recorren más de 20 minutos por distritos
Elaboración propia

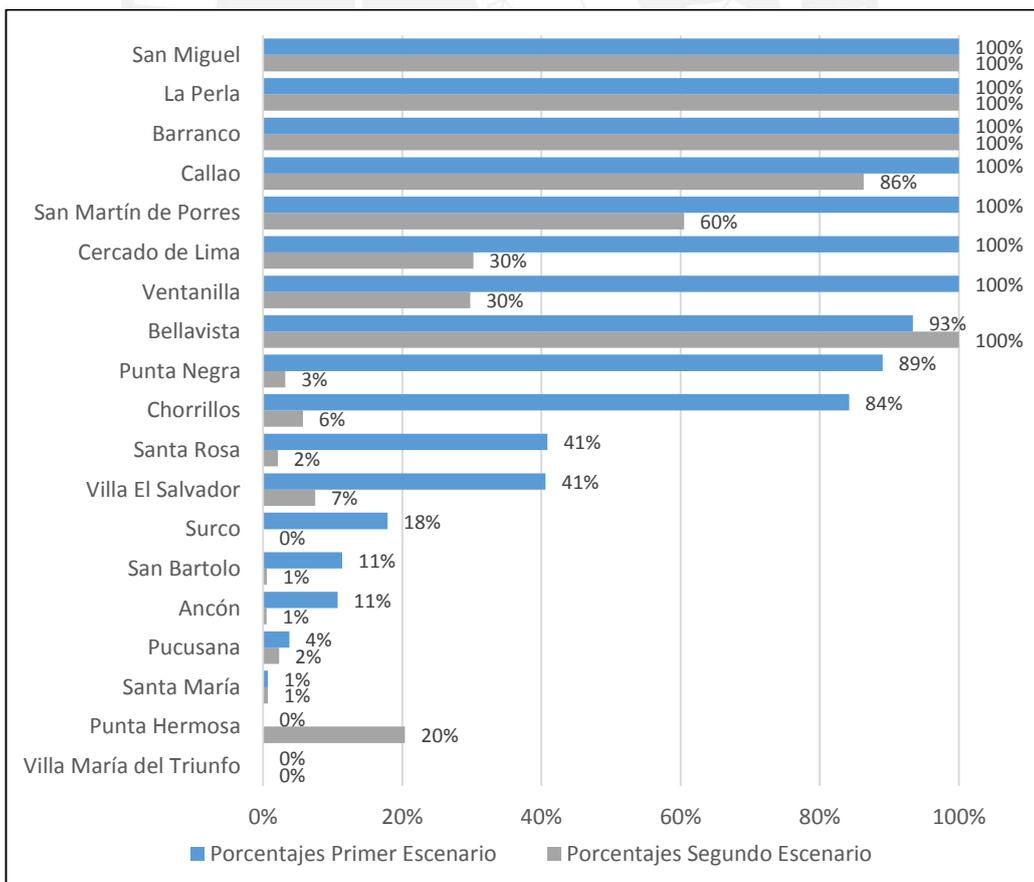


Gráfico 4.3.5. Porcentaje de utilización de capacidad de albergues por distritos
Elaboración propia

Con respecto al costo de transporte, el segundo escenario incurre 11 veces más en gastos de transporte que en el primer escenario. Esto porque hay una mayor cantidad de personas a quienes se debe suministrar ayuda humanitaria como se detalla en el gráfico 4.3.6 y además se requiere más albergues como muestra el gráfico 4.3.7.

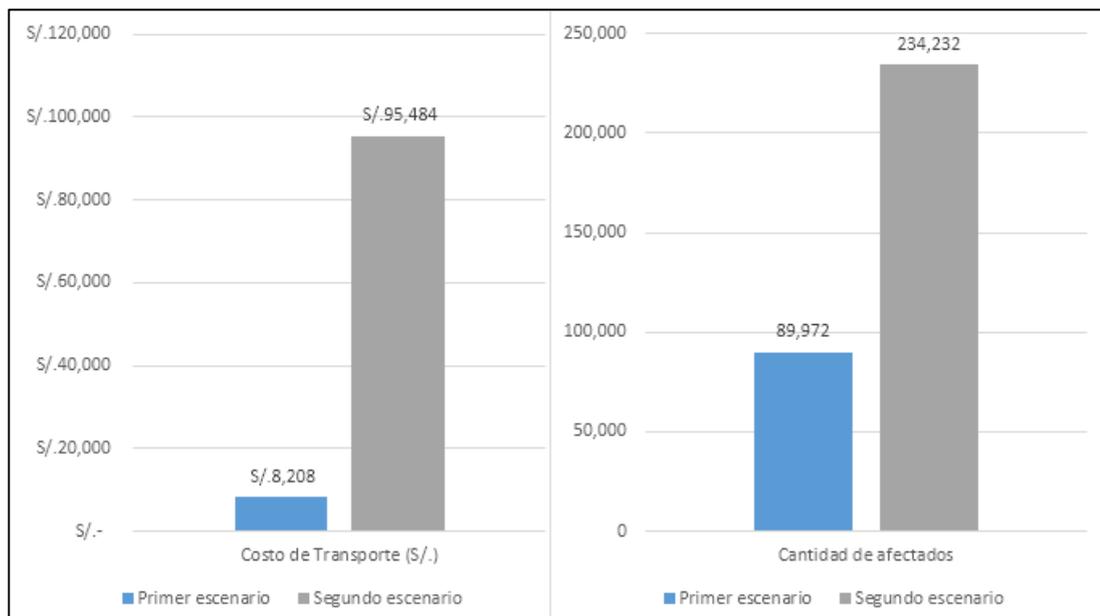


Gráfico 4.3.6. Comparación de costo de transporte y cantidad de afectados
Elaboración propia

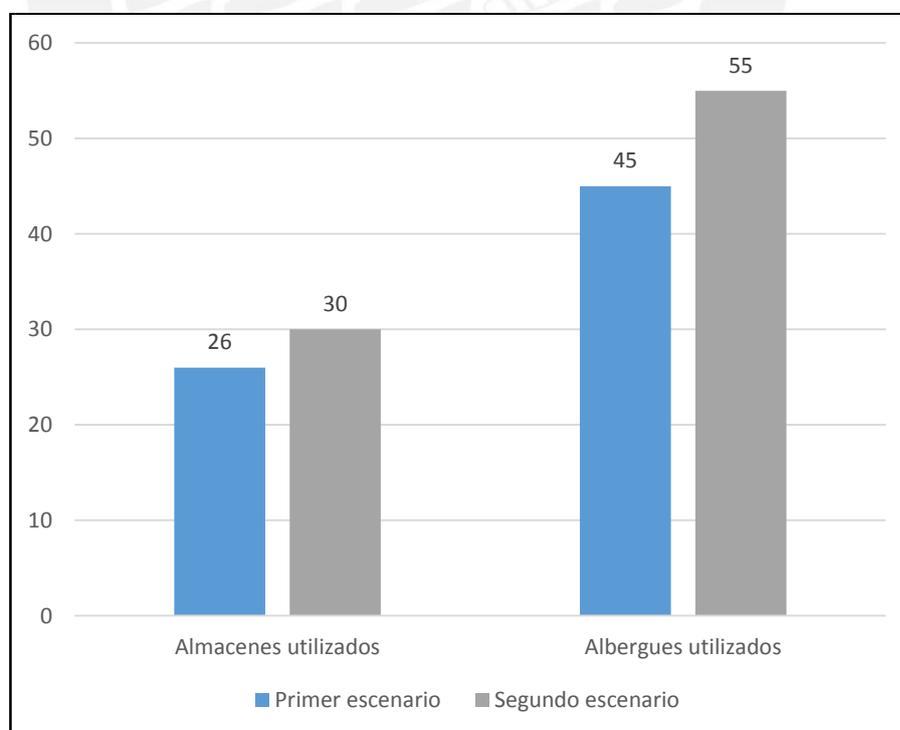


Gráfico 4.3.7. Comparación de almacenes y albergues utilizados
Elaboración propia

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Cuando surge un desastre natural en una zona poblada, la respuesta humanitaria contrarresta los efectos devastadores que pueden existir. Una de las diversas formas de acción de asistencia humanitaria es la logística humanitaria en la cual consiste en dar soporte operativo en las áreas críticas de una emergencia como la salud, comida, búsqueda de refugios, agua entre otros (Thomas, 2003).
- Una de las aplicaciones de la programación lineal entera es en el campo de la logística humanitaria. Además, existen diferentes técnicas para generar soluciones óptimas y factibles en caso el problema de logística humanitaria tenga funciones objetivo en conflicto.
- Perú es un país que sufre con frecuencia inundaciones y debido a la vulnerabilidad de sus poblaciones generan desastres naturales.
- Entre 1975 y 2013 se registró más de 3,236 inundaciones en el Perú. Las principales causas que provocan las inundaciones en el Perú son por desbordamientos, fenómenos pluviales y el fenómeno El Niño.
- Como objeto de estudio, se escogió las ciudades de Lima y Callao ya que su población es la segunda más vulnerable ante inundaciones dentro del Perú y concentra la mayor parte del PBI y PEA nacional. El impacto de una inundación en esa zona afectaría en gran manera la economía del país.
- Se determinó que un sismo de grado 9.0 Mw provocaría un tsunami que afectaría a 234,232 personas siendo 160% más del número de afectados en comparación de un sismo de 8.5 Mw en la costa peruana.
- Para el primer escenario, la solución óptima escogida para atender a 89,972 afectados da como resultado que el tiempo total de evacuación de las personas es de 5,271,359 minutos y el costo de transporte de ayuda humanitaria es de S/.8,207. Además, se debe movilizar desde 45 almacenes 5,046 m³ de ayuda humanitaria para atender 26 albergues instalados.
- Para el segundo escenario, la solución óptima escogida para atender a 234,232 afectados da como resultado que el tiempo total de evacuación de las personas es de 30,171,899 minutos y el costo de transporte de ayuda humanitaria es de

S/.95,483. Además, se debe movilizar desde 30 almacenes 13,137 m³ de ayuda humanitaria para atender 55 albergues instalados.

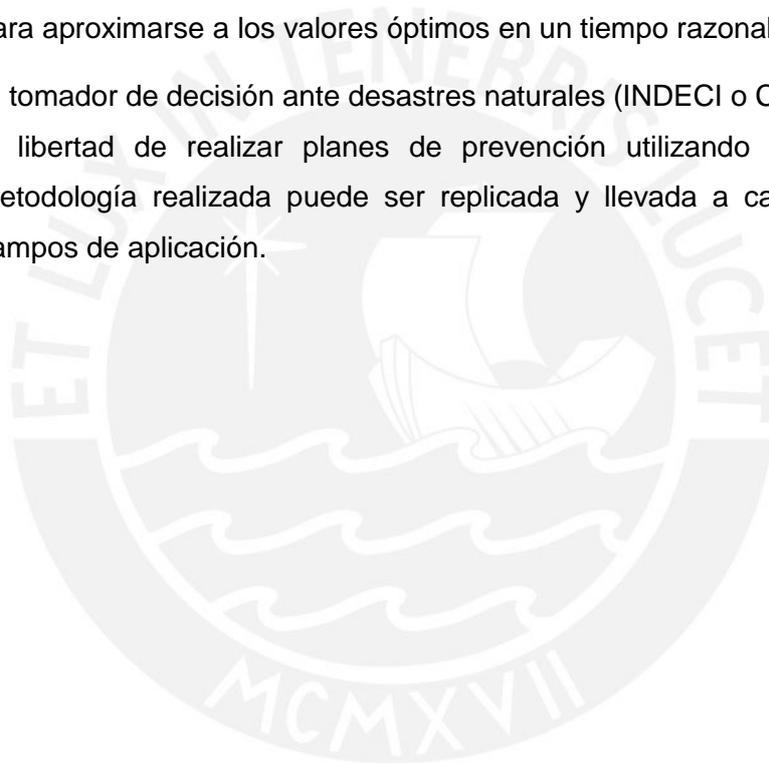
- El 96% de la población afectada del primer escenario debe trasladarse más de 20 minutos para llegar a los albergues asignados. Por otro lado, el 99% de la población afectada del segundo escenario debe trasladarse más de 20 minutos para llegar a los albergues asignados. Por lo tanto, este estudio determinó que no hay suficientes albergues cercanos para que la población pueda trasladarse en tiempo prudencial.
- Los afectados de las zonas inundadas de los distritos del Callao, Lurín, Chorrillos y Ventanilla tardarían mucho en evacuar hacia los albergues designados. Las autoridades deben de poner mayor número de albergues habilitados cercanos a estas zonas de inundación.
- Se requiere preparar albergues potenciales con mayor capacidad en los distritos de San Miguel, La Perla, Bellavista y Barranco ya que se utiliza el 100% de su capacidad para ambos escenarios.
- En el caso del segundo escenario, el modelo de optimización resultó ser de complejidad computacional alta y la mayoría de simulaciones no terminaron de completarse. Por lo tanto, la toma de decisiones podría estar sesgada por los resultados obtenidos.

5.2. Recomendaciones

- Este modelo de optimización debe considerarse como punto de partida de otras investigaciones ya que puede evaluar un mayor número de criterios y restricciones, mejorándolo y ampliando su alcance a otras provincias del país. Podrían evaluarse restricciones de capacidad de transporte, accesibilidad de la zona, costo de los almacenes.
- La base de datos del SIRAD muestra información parcial y difícil de acceder. Como mejora, se puede desarrollar una plataforma geoespacial que contengan capas de información intercambiables. Es probable que datos recolectados con mayor detalle contribuyan a mejorar la calidad de la información y las soluciones obtenidas.
- La estimación de las distancias de cada nodo involucrado es un procesamiento de información muy complicado. Dentro del SIRAD, puede considerarse el

cálculo de las distancias necesarias entre cada punto para realizar una aplicación del modelo más real.

- El SIRAD tiene información de los recursos disponibles ante una emergencia en Lima Metropolitana y Callao. Tales recursos pueden ser abastecimientos de agua, atención médica, escombreras entre otros. Con base en la formulación planteada, se puede agregar estos criterios para tener un abastecimiento completo y no solo enfocarse en los productos alimenticios.
- Debido a la complejidad del modelo, se recomienda utilizar un ordenador más sofisticado para la resolución de problemas de programación lineal mixta y que además tenga algoritmos de solución más eficaces, como las metaheurísticas, para aproximarse a los valores óptimos en un tiempo razonable.
- El tomador de decisión ante desastres naturales (INDECI o CENAPRED) tiene la libertad de realizar planes de prevención utilizando este estudio. La metodología realizada puede ser replicada y llevada a cabo en diferentes campos de aplicación.



BIBLIOGRAFÍA

- ArcGisDesktop. (2017). Crear capa de la matriz de coste OD: *ArcGIS Pro*. Consultado el 04 de julio del 2017, de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/network-analyst/make-od-cost-matrix-layer.htm>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (s.f.). *Inundaciones en el Perú*. Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://www.rimd.org/advf/documentos/4962879bcbe32.pdf>
- Banco Mundial. (2011). *Ciudades e Inundaciones: guía para la gestión integrada del riesgo de inundaciones en ciudades en el Siglo 21*. Recuperado el 1 de mayo de 2018, de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2241?locale-attribute=es>
- Banco Mundial (2014). Las inundaciones, el fenómeno natural más caro para Argentina: *Banco Mundial*. Recuperado el 1 de mayo de 2018, de <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/10/01/inundaciones-en-argentina>
- Bossa, S., Petti, M. (2012). A Numerical Model of the Wave that Overtopped the Vajont Dam in 1963. *Water Resources Management*, 27(6), 1763-1779.
- Centre of the Research on the Epidemiology of Disasters. (2018a). Consultado el 2 de febrero de 2018, de <https://www.emdat.be/Glossary>
- Centre of the Research on the Epidemiology of Disasters. (2018b). Consultado el 2 de febrero de 2018, de <https://www.emdat.be/classification>
- Centre of the Research on the Epidemiology of Disasters & Universite catholique de Louvain (CRED & UCL). (2018). *The emergency Events Database (EM-DAT)*. Consultado el 2 de febrero de 2018, de <https://www.emdat.be/classification>
- Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES). (2009). *Diseño de escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao*. Recuperado el 04 de julio del 2017, de http://www.predes.org.pe/predes/images/dis_esc_lima.pdf
- Centro Peruano Japonés de Mitigación e Investigación de Desastres (CISMID). (s.f.). *Zona de Inundación por Tsunami*. Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://sig.cismid-uni.org/tsunami/>
- Chang, M., Tseng, Y. & Chen, J. (2007). A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6), 737-754.
- Comité Andino para la Prevención y Atención de Desastres (CAPRADE). (2008). *Guía de operación para asistencia mutua frente a desastres en los países de la Comunidad Andina*. Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/201608261303GuiaOperacionAsistenciaMutua.pdf>

- Comunidad Andina. (2009). *Atlas de las dinámicas del territorio andino: población y bienes expuestos a amenazas naturales*. Lima: CEP.
- Cornejo, C., Vargas, J., Aragón, L. & Serpa, V. (2013). Localización de almacenes y distribución de ayuda humanitaria. *Proceedings Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI 2013), México*, 1-10.
- Cruz Roja. (2008). *Albergues Provisionales*. Madrid, España: Dirección General de Protección Civil de España.
- Dantzig, G. (1998). *Linear Programming and Extensions*. Princeton N.J., USA: Princeton University Press.
- Doumpos, M. & Zopounidis, C. (2002). *Multicriteria Decision Aid Classification Methods*. Boston, USA: Springer US.
- Ehrgott, M., Gandibleux, X. (2003). Multiple objective combinatorial optimization---a tutorial. *Multi-objective programming and goal programming*, 3-18. Springer, Berlin
- Ehrgott, M., Ruzika, S. (2008). Improved ϵ -Constraint Method for Multiobjective Programming. *Journal Of Optimization Theory And Applications*, 138(3), 375-396.
- Escudero, L. (s.f.). Monitoreo Satelital de la Laguna "LA NIÑA" 1998 – 1999: Dirección General de Investigaciones en Pesca. Consultado el 1 de marzo de 2018, de:
<http://www.imarpe.gob.pe/argen/nina/lanina.html#METODOLOGIA>
- Federal Emergency Management Agency. (s.f.). Tipos de inundaciones: FEMA. Consultado el 10 de enero del 2018, de
<https://www.fema.gov/es/tipos-de-inundaciones#4>
- Figueira, J.R., Mousseau, V. & Roy. B. (2016). ELECTRE Methods. En S. Greco, J. R. Figueira & M. Ehrgott (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis*, (pp. 155-185). New York, USA: Springer-Verlag.
- García, L. & Muñoz, A. (2009). Localización empresarial en Aragón: una aplicación empírica de la ayuda a la decisión multicriterio tipo ELECTRE I y III. Robustez de los resultados obtenidos. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 7, 31-56.
- Gaytán, J., Arroyo, P. & Enríquez, R. (2011). Un modelo bi-criterio para la ubicación de albergues, como parte de un plan de evacuación en caso de inundaciones. *Revista Ingeniería Industrial*, 11(2), 35-56.
- Gobierno Regional de Loreto, Cooperazione Internazionale, Cruz Roja Peruana, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Plan Internacional, Perú, Oficina Nacional. *INTERVENCIÓN FRENTE A LA EMERGENCIA POR INUNDACIONES EN LORETO EN EL AÑO 2012. LECCIONES APRENDIDAS Loreto*. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de

<http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2284/doc2284-contenido-esp.pdf>

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2002). Cambio climático y biodiversidad. Informe de síntesis. Recuperado el 01 de marzo de 2018, de <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Recuperado el 10 de marzo de 2018, de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- Han, I., Yuan, F. Chin, S. & Hwang, H. (2006). Global Optimization of Emergency Evacuation Assignments. *Interfaces*, 36(6), 502-513.
- Hillier, F. Lieberman, G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (9.ª ed.). México D.F., México: McGraw-Hill.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (s.f.). *Lineamientos para la implementación de los procesos de la Gestión Reactiva*. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de <https://www.indeci.gob.pe/objetos/microsite/OQ==/MTYx/fil20150911181648.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2005). *Plan de Evacuación "Callao 2005"*. Recuperado el 20 de setiembre del 2017, de <https://www.indeci.gob.pe/objetos/secciones/MQ==/OQ==/NjE=/lista/NzE=/MTEw/MTEw/3201012101542311.zip>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2006). *Protocolo para Instalación de Albergues*. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de https://www.indeci.gob.pe/aten_desat/pdfs/proto_%20albergues%202006.pdf
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2009). *Gestión del Riesgo de Desastres para la Planificación del Desarrollo Local*. Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1369/doc1369.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2011). *Manual de Estimación de Riesgo ante Inundaciones Fluviales/Perú*. Dirección Nacional de Prevención, 2011. Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1743/doc1743.htm>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2012). *Educación Comunitaria para la Gestión del Riesgo de Desastres: Módulos para Capacitadores Regionales*. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1935/doc1935.htm>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2013). *Guía de Orientación de la Asistencia Alimentaria en Situaciones de Emergencia, "GOASE"*. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2287/doc2287-contenido.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2014a). *Compendio Estadístico del INDECI 2013 en la preparación, respuesta y rehabilitación ante emergencias y desastres*

2013. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de <https://www.indeci.gob.pe/objetos/secciones/OQ==/NDY=/lista/MzMx/NzU5/201705031737501.pdf>

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2014b). *Cartilla de la Gestión Reactiva del Riesgo. Marco Conceptual*. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2521/doc2521-contenido.pdf>

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2014c). *Plan Logístico INDECI AF-2014, para Ayuda Humanitaria ante Emergencias o Desastres*. Lima. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de <http://sinpad.indeci.gob.pe/UploadPortalsINPAD/PLAN%20LOGISTICO%20-2014.pdf>

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2018). *Inundación*. Lima. Recuperado el 02 de febrero del 2018, de <https://www.indeci.gob.pe/prevencion.php?item=NQ>

Instituto Nacional de Defensa Civil & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2011). *Estudio SIRAD: Recursos de respuesta inmediata y de recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en Lima Metropolitana y Callao*. Recuperado el 20 de setiembre del 2016, de http://sirad.indeci.gob.pe/static/SIRAD_Publicacion_ES.pdf

International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. (2015). Pakistan Red Crescent gets early assistance to flood victims. Recuperado el 10 de enero de 2018, de <http://www.ifrc.org/ar/news-and-media/news-stories/asia-pacific/pakistan/pakistan-red-crescent-gets-early-assistance-to-flood-victims/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2016a). *Producto Bruto Interno por Años, según Departamentos Valores a Precios Constantes de 2007*. Recuperado el 04 de julio del 2017, de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/indices_tematicos/pbi_peru_1.xlsx

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2016b). *Población Económicamente Activa, según Ámbito Geográfico, 2004-2014*. Recuperado el 04 de julio del 2017, de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/indices_tematicos/orden-1_70.xls

Jaimes, L., Sandoval, P., Torres, R. (1992). Aplicación del Método ELECTRA para la Selección de un Catalizador de Hidrodealquilación de Tolueno. *Acta Mexicana de Ciencia y Tecnología*, X(37), 35-43.

Jiménez, C., Perfettini, H., Puma, N., Moggiano, N., Ortega, E., Vernier, P., Gluski, P. & D'Ercole, R. (2010). *Estudio de Peligro de Maremoto en Lima y Callao y Cartografía de las Zonas Inundables*. Lima: Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://www.indeci.gob.pe/proyecto58530/objetos/archivos/20110606103441.pdf>

Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20), 2981-2987.

- Khamis, M. & Osorio, C. (2012). *Análisis de riesgos de desastres en Chile: VII Plan de Acción DIPECHO en Sudamérica, 2011-2012*. Santiago, Chile. Recuperado el 1 de mayo de 2018, de <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002329/232991s.pdf>
- Larrañeta, A. (13 de octubre de 2015). "Los desastres naturales que más aumentan en Europa son las inundaciones y se pueden evitar": *20 minutos*. Recuperado el 1 de mayo de 2018, de <https://www.20minutos.es/noticia/2578099/0/desastres-naturales-inundaciones/entrevista/debarati-quha-sapir/>
- Machuca, R. (2014, diciembre). Impactos económicos de El Niño costero en el sector vivienda a causa de inundaciones en la costa norte del Perú. *Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño. Boletín Técnico. Instituto Geofísico del Perú (IGP)*. Recuperado el 1 de mayo de 2017, de: http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/Divulgacion_PPR_EI_Nino_IGP_201412.pdf
- Marianov, V. & ReVelle, C. (1995). Siting Emergency Services. *In Facility Location: A Survey of Applications and Methods*. (1), 199-223.
- Marler, R., & Arora, J. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural And Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369-395.
- Mejía, M. (2012). Modelo de optimización y metaheurístico integral del problema de Logística Humanitaria a través de un enfoque multicriterios: Caso de estudio en Villahermosa. (Disertación doctoral, Tecnológico de Monterrey, Toluca, México).
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (s.f.). What are El Niño and La Niña?: *NOOA National Ocean Service*. Consultado el 10 de enero de 2018, de: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html>
- Perevochtchikova, M., Lezama de la Torre, J. (2010). Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco México. *Journal of Latin American Geography*, 9(2), 73-98.
- Perú21. (2013). Loreto: Alto Amazonas en emergencia por desborde del río Huallaga: *Perú21*. Consultado el 20 de setiembre del 2016, de <https://peru21.pe/lima/loreto-alto-amazonas-emergencia-desborde-rio-huallaga-99060>
- Pourrahmani, E., Delavar, M. & Mostafavi, M.A. (2015). Optimization of an evacuation plan with uncertain demands using fuzzy credibility theory and genetic algorithm. *International Journal Of Disaster Risk Reduction*, 14(4), 357-372.
- Presidencia de la República de México. (2013). Tipos de lluvias e inundaciones: *gob.mx*. Consultado el 15 de enero de 2018: <https://www.gob.mx/presidencia/articulos/tipos-de-lluvias-e-inundaciones>
- Prevención de Desastres en la Comunidad Andina. (2006). *Análisis de base de datos*

de pérdidas por desastres en Perú. Consultado el 20 de setiembre del 2017, de <http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/r2/osso/Cons025-2006-CorporacionOSSO-informefinal-Peru.v.1.8.pdf>

Programa de Preparación ante Desastres del Departamento de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Comisión Europea. (2012). *La Gestión del Riesgo de Desastres en el Perú: Documento País Perú 2012*. Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://dipecholac.net/docs/files/197-peru-la-gestion-del-riesgo-de-desastres-en-el-peru-documento-pais-2012.pdf>

Ruiz, J. (2015). Métodos de decisión multicriterio ELECTRE y TOPSIS aplicados a la elección de un dispositivo móvil. (Proyecto Fin Carrera. Ingeniería Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España). Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5619/fichero/PFC+Jaime+Ruiz+Pallar%C3%A9s.pdf>

Salas, J. (2007). Vulnerabilidad, pobreza y desastres 'socionaturales' en Centroamérica y El Caribe. *Informes de la Construcción*. (59). Recuperado el 04 de julio del 2017, de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewArticle/580>

Schrage, L. (1997). *Optimization modeling with LINDO*. Chicago, USA: Lindo Systems.

Serpa, V. (2014). *Optimización y Localización de Almacenes de Abastecimiento para la Atención de un Terremoto de Gran Magnitud en Lima Metropolitana y Callao*. (Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú).

Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres. (s.f.) *Servidor SIRAD*. [Base de datos]. Consultado el 04 de julio del 2017, de <http://sirad.indeci.gob.pe>

Sistema de Inventario de Desastres (DESINVENTAR). (2009). Guía Metodológica Versión 8.1.9. Consultado el 10 de junio del 2018, de <https://www.desinventar.org/es/metodologia/DesInventar-MethodologicalGuide-Spanish.pdf>

Sistema de Inventario de Desastres. (2016). [Base de datos]. Consultado el 20 de setiembre del 2016, de https://online.desinventar.org/desinventar/#PER-1250695241-peru_inventario_historico_de_desastres

Sistema Nacional De Defensa Civil (2004) Plan nacional de atención y prevención de desastres. Lima, Perú.

Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD). (2014). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres PLANAGERD 2014-2021*. Consultado el 20 de setiembre del 2016, de <https://www.indeci.gob.pe/objetos/microsite/OQ==/NjQ=/fil20140605171327.pdf>

- Takahashi, R. (2007). *Otimização Escalar e Vetorial - Volume 3: Otimização Vetorial*. Belo Horizonte, Brasil. Recuperado el 10 de octubre de 2016, de <http://www.mat.ufmg.br/~taka/Download/OTEV-Vol2.pdf>
- The Emergency Events Database (EMDAT). (2018) [Base de datos] Consultado el 1 de marzo de 2018, de: https://www.emdat.be/emdat_db/
- The Queensland Government. (2011). Understanding floods: Questions & Answers. Recuperado el 25 de febrero del 2018, de http://www.chiefscientist.qld.gov.au/images/documents/chiefscientist/pubs/floods/understanding-floods_full_colour.pdf
- Thomas, A. (2003). *Humanitarian Logistics: Enabling Disaster Response*. Recuperado el 20 de abril del 2017, de <http://www.fritzinstitute.org/pdfs/whitepaper/enablingdisasterresponse.pdf>
- Tola, R. (2017). Las inundaciones en Perú ya dejan al menos 90 muertos. *EL PAÍS*. Recuperado el 10 de junio del 2018, de https://elpais.com/internacional/2017/03/26/america/1490560131_414607.html
- Winston, W. (2005). *Investigación de Operaciones: Aplicaciones y Algoritmos* (4.^a ed.). México D.F., México: Thompson.