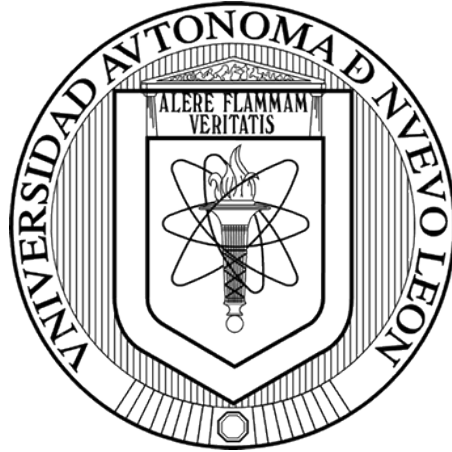


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS



UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN BI-NIVEL PARA ENVIAR,  
RECIBIR Y DISTRIBUIR AYUDA EN ESPECIE DESPUÉS DE  
HABER OCURRIDO UN DESASTRE NATURAL

PRESENTA

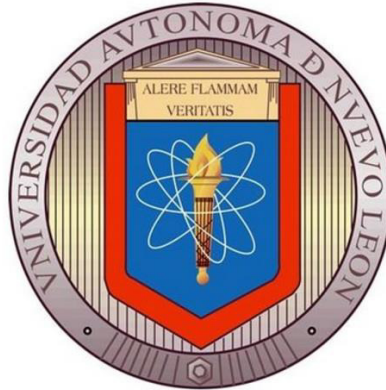
EDNA LIZET GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATEMÁTICAS

OCTUBRE 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN BI-NIVEL PARA ENVIAR, RECIBIR Y  
DISTRIBUIR AYUDA EN ESPECIE DESPUÉS DE HABER OCURRIDO UN  
DESASTRE NATURAL**

**PRESENTA**

**EDNA LIZET GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATEMÁTICAS**

**OCTUBRE 2014**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN BI-NIVEL PARA ENVIAR,  
RECIBIR Y DISTRIBUIR AYUDA EN ESPECIE DESPUÉS DE  
HABER OCURRIDO UN DESASTRE NATURAL**

**PRESENTA**

**EDNA LIZET GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

**EN OPCION AL GRADO DE:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATEMÁTICAS**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN.**

**OCTUBRE 2014**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

Los miembros de este comité recomendamos que la tesis: Un modelo de optimización bi-nivel para enviar, recibir y distribuir ayuda en especie después de haber ocurrido un desastre natural, presentada por la Lic. Edna Lizet González Rodríguez, sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Matemáticas.

El Comité de Tesis

---

Dr. José Fernando Camacho Vallejo

Asesor

---

Dra. Rosa Guadalupe González

Co-asesor

---

Dr. Javier Almaguer

Revisor

Vo. Bo.

---

Dr. José Fernando Camacho Vallejo

Coordinador del Posgrado en Ciencias con Orientación en Matemáticas

**Agradecimientos:**

Agradezco primeramente a Dios por haberme acompañado siempre en los momentos difíciles, por haberme dado la oportunidad de salir adelante y mantenerme con vida y salud.

Agradezco la confianza, apoyo y dedicación del Dr. José Fernando Camacho Vallejo quien me dirigió durante el desarrollo de esta tesis, gracias por los conocimientos que me permitió adquirir, que sin ellos éste trabajo no sería posible, gracias por haberme permitido crecer profesionalmente.

Agradezco a la Dra. Rosa González por haberme proporcionado los datos del caso de estudio que presentamos en este trabajo.

Gracias a todos los maestros que me dieron clases, por haberme compartido sus conocimientos y dedicarme su tiempo y paciencia.

Agradezco infinitamente a mi familia, que siempre me apoyaron en todo momento, a mi esposo y mis hijas que son el motor de mi vida y la llenan de alegría, a mi mamá que es una bendición, siempre está ahí para mí y me ayudó siempre que la necesité, gracias por todo; a mis suegros que siempre están ahí para ayudarme cuando los necesito, y al resto de mi familia por su motivación y apoyo.

También agradezco a mi papá que me cuida desde el cielo, por haberme heredado el gusto por las matemáticas.

Por último agradezco al CONACYT por el apoyo que nos brindó con las becas durante la Maestría.

Gracias a todos por su apoyo y comprensión.

# Contenido

1	Introducción.....	8
1.1	Revisión de literatura.....	13
1.2	Descripción del Problema.....	13
1.3	Objetivo.....	13
1.4	Metodología.....	14
1.5	Estructura de la tesis.....	14
1.6	Programación Bi-nivel.....	16
2	Modelación del Problema	
2.1	Planteamiento del problema.....	16
2.2	Modelo Matemático.....	17
2.3	Reformulación del Modelo.....	20
2.4	Otra forma de mostrar el modelo.....	23
3	Caso de Estudio	
3.1	Análisis del Terremoto en Chile ocurrido en 2010.....	24
4	Experimentación Computacional	
4.1	Ambiente computacional.....	30
4.2	Tres distintos enfoques.....	30
4.3	Resultados.....	31

5	Conclusiones	
5.1	Descripción del trabajo realizado.....	35
5.2	Conclusiones y recomendaciones.....	36
5.3	Trabajo futuro.....	37
6	Referencias.....	38
	Apéndices.....	41

# Capítulo 1

## Introducción

En los últimos años se han presentado varios desastres naturales con consecuencias catastróficas para la población afectada. Entre ellos podemos mencionar los terremotos en Haití y en Chile en 2010, donde dichos países se vieron sumamente afectados y requirieron de la ayuda oportuna de todo el mundo. Otro ejemplo es el tsunami ocurrido en la costa de Japón en 2011, donde gran parte de la región afectada fue devastada. Estos hechos propiciaron que muchos países y organismos internacionales enviaran ayuda que consistía en dinero, voluntarios y productos.

Los productos que comúnmente se envían son medicamentos, comida enlatada, agua potable, pañales, entre otros. Es evidente la urgente necesidad de recibir esos productos para poder distribuirlos en las regiones afectadas y evitar que se incrementen las muertes por hambruna o por enfermedades. Estos hechos reflejan la necesidad de tener una distribución eficiente de dichos artículos.

### 1.1 Revisión de Literatura

Al hacer la revisión de literatura para comenzar con nuestra investigación, se encontraron los siguientes trabajos:

Caunhye et al. (2012) resalta la necesidad y la importancia de la eficiente distribución en el envío de productos a las regiones afectadas, ellos enlistan algunos trabajos realizados sobre distribución de ayuda y su transportación casual. Además, es evidente la importancia de la rapidez y eficiencia que tiene que tener la cadena de suministro involucrada en estas situaciones, Wang y Rong (2007) y Ji y Zhu (2012) presentan trabajos enfatizando este hecho.

La rama que se encarga de estudiar el tipo de problemas antes mencionados es la *Logística Humanitaria*, la cual se enfoca en modelar problemas relacionados con el almacenamiento y distribución de productos requeridos por la población afectada debido a la ocurrencia de un desastre natural o bien, un desastre provocado por el hombre. Por ejemplo, Wamsler et al. (2013), y Dües et al. (2013), consideran la respuesta post desastre, es decir, cuando la ayuda se envía después de haber ocurrido una catástrofe provocada por el cambio climático ocasionado por el crecimiento de las zonas urbanas.

Gupta et al. (2002), señaló la importancia de contar con una planificación eficaz para la construcción de centros de negocios, debido al riesgo ambiental provocado por un desastre natural. Sin importar la causa original, este tipo de situaciones las podemos



analizar de dos formas, proactivas y reactivas. Proactivas para estudiar el problema de interés antes de que ocurra un desastre y reactivas para el caso cuando ya ocurrió y hay que decidir las acciones que deberán realizarse. Altay y Green (2006) presentan una extensa revisión de literatura sobre los problemas relacionados con logística humanitaria, además hacen una división en cuatro etapas relacionadas con estos desastres. La primera es la etapa de *Mitigación* donde se analizan las acciones que se deben tomar para disminuir la probabilidad de ocurrencia de un desastre o bien, reducir el impacto en caso de que ocurra. La etapa de *Preparación* se refiere a planear las actividades a seguir en caso de un desastre. La etapa de *Respuesta* es cuando ya ocurrió un desastre y se deben realizar acciones para evitar que se incrementen las consecuencias desastrosas, implica el empleo de los recursos y procedimientos de emergencia para preservar la vida, la infraestructura, el medio ambiente y la estructura social, económica y política de la comunidad afectada. Por último, la etapa de *Recuperación* es aquella en que se llevan a cabo las acciones que devuelvan a la normalidad a la zona afectada, ya sea a corto o mediano plazo.

Este trabajo está enfocado específicamente en analizar una situación relacionada con la etapa de *Respuesta*; el problema considerado en esta tesis es el de distribuir eficientemente la ayuda hacia las zonas afectadas. En esta etapa la mayoría de las situaciones estudiadas están implicadas con problemas de distribución y transportación, en general difíciles de modelar debido a la gran cantidad de parámetros de las variables en los problemas de la vida real. Duman (2007) describe las dificultades y la importancia de estos problemas. Es decir, considera que cuando ya ocurrió el desastre, las demandas de las áreas afectadas cambian constantemente e incluso algunos nodos y bordes de la red desaparecen. Friedrich et al. (2000) propone un modelo dinámico integrado donde se intentaba minimizar el número de muertes esperadas en cada período de tiempo, para probar el modelo ahí propuesto implementaron un algoritmo de Búsqueda Tabú y otro de Recocido Simulado. Bajo este mismo enfoque de la función objetivo, Sheu y Chen (2005) propusieron un algoritmo de tres etapas: primero agrupaban las zonas afectadas en base a las características de la demanda y la prioridad, después identificaban el centro de gravedad de cada agrupamiento para hacer la entrega de la ayuda y por último, el ruteo de vehículos para realizar la distribución. Como continuación del trabajo recién descrito, Sheu (2007) agregó un caso de estudio de un terremoto en Taiwán. Cabe mencionar que el esquema de la cadena de suministro que ahí se presenta es muy parecido al que consideramos en nuestro trabajo. Vitoriano, et al. (2011), propone un modelo en el que consideran conjuntamente la estructura de los problemas de la red de transporte, rutas para vehículos y de múltiples productos básicos, el modelo resultante era un problema de optimización Multi-criterio y fue aplicado a un caso de estudio basado en el terremoto de Haití del 2010. También, Rath y Gutjahr (2014) consideran el problema donde existen centros de acopio que se encargan de recibir la ayuda externa y plantean una función multi-objetivo donde intentan minimizar el costo de operar un centro de acopio, minimizar el costo de distribución y maximizar la demanda cubierta. Los autores reformulan el problema como un problema de programación lineal Entero-mixto, lo resuelven por etapas usando una heurística y

comparan sus resultados obtenidos contra los que encuentra el algoritmo clásico NSGA-II.

Algo que también es de interés es proveer sistemas que traten de brindar ayuda en la toma de decisiones de una situación de emergencia. Bajo este enfoque, Rathi et al. (1993) desarrollaron un modelo de programación lineal en una cadena de suministro para una situación de emergencia. En esos modelos ya se tenía la demanda fija para cada zona afectada y el centro de acopio que iba a abastecer a dicha zona. El problema se reducía a determinar el número de camiones asignados para cada ruta, considerando que no había limitantes en el número de camiones disponibles. Ese modelo era sencillo en comparación con el que analizaron en Özdamar et al. (2004) donde estudiaron el caso donde se combinaba el problema del flujo de múltiples productos en una red y el problema de ruteo de vehículos. Este problema debía resolverse en dos etapas para generar el plan de distribución que indicara la ruta de entrega y las cantidades de cada producto. Una consideración que hicieron fue que los camiones no debían regresar al centro de distribución porque asumían que los centros de distribución no estaban fijos y podían cambiar de ubicación. El método de solución que usaron fue el de Relajación Lagrangiana y experimentaron con un caso real sobre un sismo en Turquía. También, Wex et al. (2011) provee dos enfoques para tomar decisiones eficientes relacionadas al acopio de la ayuda en especie y a su distribución. El primer modelo era uno de asignación en el que se minimiza el tiempo que se tarda en terminar de ayudar a una zona afectada a la vez; en el segundo modelo se podía atender varias áreas afectadas al mismo tiempo.

En los modelos anteriores se considera una demanda conocida, ya sea obtenida mediante un pronóstico o de alguna otra manera. Pero como no sabemos la magnitud del desastre o el tiempo en que ocurre es razonable considerar la demanda de la zona afectada como estocástica. Es por esto que se han presentado varios modelos de dos etapas de programación estocástica para analizar estos problemas. Por ejemplo, Barbarosoglu y Arda (2004) proponen un modelo donde en la primera etapa se minimizan los costos de transportación y de los recursos; después en la segunda etapa se minimizan los costos derivados del flujo y de inventario. Bajo esta clasificación de problemas estocásticos pero enfocado en la parte de *Preparación* es presentado por Mete y Zabinsky (2010) donde se busca decidir la localización de centros de ayuda y el nivel de inventario de medicamentos, en dicho modelo se busca minimizar la duración de la transportación de los medicamentos y la demanda insatisfecha. Además, los autores presentan un caso de estudio de la ciudad de Seattle. Por último, también encontramos el trabajo hecho por Rawls y Turnquist (2010) donde también se busca tener un inventario de productos requeridos para después distribuirlos. Ellos proponen un algoritmo heurístico basado en el método L-shaped, el cual es capaz de

resolver problemas de gran escala y lo validan mediante un caso de estudio de la ocurrencia de un huracán en el área de la costa del Golfo de los Estados Unidos.

Existen trabajos sobre logística humanitaria analizados mediante jerarquías predefinidas para los involucrados en la situación desastrosa. Özdamar y Demir (2012) consideran un modelo jerárquico de agrupamiento y ruteo. El agrupamiento lo hacen de forma multi-nivel donde en cada nivel de decisión se hacen agrupamientos (de menor tamaño) de las zonas afectadas. La parte de ruteo es un problema de flujo en redes con capacidades y la consideran de manera independiente al problema de agrupamiento, el cual se resuelve directamente con un optimizador. Por otro lado, Liberatore et al. (2014) proponen un modelo jerárquico donde primero se busca restablecer los caminos dañados por el desastre para después distribuir de mejor manera la ayuda solicitada. Es importante señalar que los autores hacen énfasis en la importancia de coordinar la distribución de ayuda con el restablecimiento de los caminos. Para mostrar la validez de su modelo analizan un caso de estudio basado en el terremoto de Haití. A pesar de que estos modelos mencionan que consideran jerarquías ninguno de ellos pertenece al área de programación multi-nivel. Remarcando las diferencias entre estos dos enfoques, Gramani et al. (2011), concluyó que combinando dos problemas con variables entre sí, arrojará mejores resultados que los obtenidos cuando se toman en cuenta los problemas de manera secuencial. Ellos ilustran este hecho considerando el problema de la planeación de la producción combinando los problemas de tamaños y corte de material.

La principal diferencia con el modelo que nosotros proponemos en el presente trabajo es un problema de programación bi-nivel, la cual es un caso particular de programación multi-nivel en el cual solo se consideran dos niveles de decisión.

Muchas situaciones en la vida real involucran tomadores de decisiones en dos niveles relacionados con una jerarquía preestablecida. La existencia de esta jerarquía hace que este tipo de problemas no puedan ser considerados en la categoría de optimización Multi-objetivo la programación bi-nivel abarca estos problemas.

En los problemas de programación bi-nivel se consideran dos tomadores de decisiones, el de la parte superior es llamado el líder y el de la parte inferior es llamado el seguidor. En ambos niveles, pueden existir restricciones y cada uno de los tomadores de decisiones involucrados controlan un conjunto de las variables del problema y tratando de optimizar su propia función objetivo. El líder toma una decisión, el seguidor optimiza su objetivo teniendo en cuenta la decisión tomada por el líder. Por lo tanto, el líder debe seleccionar la decisión que optimice su función objetivo teniendo en cuenta la reacción del seguidor.

En otras palabras, los problemas de programación bi-nivel son problemas de programación matemática donde un subconjunto de las variables debe ser la solución óptima de otro programa matemático.

A continuación se mostrará la revisión de literatura que encontramos sobre problemas bi-nivel. Una breve introducción sobre programación bi-nivel se presenta en la sección 1.6 mostrando las características básicas de estos problemas.

Luego de una extensiva revisión de literatura, encontramos que en el área de logística humanitaria hay muy pocos trabajos modelados como problemas de programación bi-nivel. Por ejemplo, desde el punto de vista de analizar desastres ocasionados por el hombre, Arroyo y Galiana (2005) consideran el problema de la amenaza terrorista como un problema bi-nivel. En el nivel superior el terrorista busca maximizar el daño ocasionado atacando al mínimo número de líneas de un sistema de energía mientras que en el nivel inferior se intenta minimizar las cargas derramadas ocasionadas por el ataque. El problema bi-nivel propuesto resulta ser no-lineal mixto entero y lo reducen a un problema lineal mixto entero de un solo nivel utilizando las condiciones de optimalidad de Karush-Khun-Tucker y algunas restricciones válidas para evitar la no-linealidad. Recientemente Aksen y Aras (2012) analizan un juego líder-seguidor donde se pretende proteger instalaciones para prevenir la re-asignación de los clientes en caso de un ataque. El líder busca minimizar la suma de los costos incurridos para instalar, proteger y utilizar esa instalación. El seguidor busca destruir las instalaciones desprotegidas para afectar la capacidad de abastecimiento de las plantas no restantes. Para resolver el problema proponen un algoritmo basado en Búsqueda Tabú. También, Losada et al. (2012) formulan el problema de protección de instalaciones como un programa bi-nivel lineal mixto entero, el cual analiza el tiempo de recuperación de un sistema después de un incidente considerando que pueden ocurrir varios incidentes más a través del tiempo. Ninguno de estos tres trabajos analiza una situación perteneciente a la etapa de Respuesta.

En cuanto a situaciones de catástrofes por desastres naturales, nosotros solo encontramos los siguientes artículos: en la parte de *Preparación*, Kongsomsaksakul et al. (2005) proponen un modelo bi-nivel para la localización de refugios en caso de una inundación. El nivel superior consiste en localizar los refugios de tal forma que se minimice el tiempo total de evacuación y el nivel inferior representa a los evacuados quienes escogen el refugio al que irán y la ruta de evacuación. Para resolverlo propusieron un algoritmo genético con datos reales obtenidos de una presa ubicada en Utah. Relacionado con este tema, Li et al. (2012), formularon un problema de programación bi-nivel estocástico donde el nivel superior consiste en un modelo de localización y asignación de refugios y el nivel inferior contiene los evacuados que buscan las mejores rutas actualizadas. Los autores analizaron una experimentación

con escenarios múltiples para medir el desempeño de sus algoritmos heurísticos propuestos. Barbarosoglu et al. (2002), analiza un problema de minimización de costos de transportación y asignación de pilotos a helicópteros, mientras que también se minimiza el tiempo de rescate al asignar de la mejor manera los helicópteros a las bases de operaciones. Finalmente, Feng y Weng (2005) consideran el problema bi-nivel en donde ocurrió un terremoto que afectó la red de carreteras de la zona, entonces el líder trata de maximizar el flujo de vehículos que entran a la zona afectada para proveer ayuda, mientras que los seguidores son los usuarios que buscan viajar por la ruta no afectada que minimice su tiempo de viaje. Esta situación genera tráfico lo cual impacta en las labores de ayuda y recuperación, por lo que un organismo gubernamental debe de regular el uso de los caminos existentes. Este trabajo, al igual que el problema que estamos analizando, pertenece a la etapa de *Respuesta*.

Holguin-Veras et al. (2013), establece la importancia de una adecuada función objetivo en la logística humanitaria; ellos critican que se considere únicamente la distribución de los costos en la función objetivo en casos donde ya ocurrió el desastre. También, Cruz (2013) menciona algunos beneficios de tomar en consideración la responsabilidad social de las partes involucradas en la cadena de suministro. Motivados por estas ideas, la función objetivo que nosotros proponemos refleja el tiempo de respuesta total para la entrega de ayuda a las zonas afectadas.

## 1.2 Descripción del Problema

Nuestro problema de interés podría verse como sigue: cuando ocurre una catástrofe natural o provocada por el hombre, hay organismos internacionales que envían ayuda en especie al país necesitado, esta ayuda debe llegar en el menor tiempo posible para evitar que las muertes por hambre o por enfermedades se incrementen. Además de considerar el tiempo que tarde en llegar la ayuda consideran los costos del envío de la ayuda por parte de los países que la mandan, es un problema innovador porque comúnmente se toma en cuenta solamente las necesidades del país afectado. Tomando en cuenta que la prioridad es cubrir las necesidades del país afectado, también se toman en cuenta la parte económica del país que envía la ayuda.

Este tipo de problemas encajan perfectamente dentro del área de programación Bi-nivel debido a la notoria jerarquía que existe en el proceso de toma de decisiones. En el capítulo 1.6 se explicará más a detalle.

## 1.3 Objetivo

El objetivo de esta investigación es encontrar la configuración óptima de los envíos y la forma de distribución de los productos que son enviados hacia las zonas afectadas

por algún medio de transporte. Además de mostrar la importancia de utilizar un modelo Bi-nivel en lugar de un modelo de un solo nivel, comparando con dos enfoques con puntos de vista distintos pero con el mismo escenario.

Para poder mostrar el equilibrio, dos de los enfoques que mostraremos estarán en los extremos, de esta forma podremos confirmar como el modelo bi-nivel esta entre los dos modelos, llegando a un equilibrio de ambas partes.

## 1.4 Metodología

En primer lugar se hizo la revisión de varios trabajos relacionados con el tema de nuestro problema para obtener la revisión de literatura, después se planteó el problema para después modelarlo de forma bi-nivel, el modelo se reformuló para poderlo resolver de forma exacta con CPLEX. Para poder utilizar el modelo se trabajó con un caso de estudio del terremoto en Chile que ocurrió en 2010. Para poder dar recomendaciones al respecto se hicieron 3 diferentes modelos con el mismo enfoque del problema; ya resolviendo los modelos distintos, se hicieron comparaciones entre los tres y se obtuvieron conclusiones y recomendaciones al respecto.

## 1.5 Estructura de la Tesis

En esta sección se describe como está estructurada la tesis.

En el capítulo 1 se muestra una introducción del problema acompaña de una extensa revisión de literatura; para que se pudiera comprender mejor el modelo, también se agregó una sección en donde se explica la programación bi-nivel.

En el capítulo 2 se muestra el planteamiento del problema, el modelo que se utilizó para resolver el problema, además se plantea la reformulación que se hizo para poder resolverlo de forma exacta y se muestra otra alternativa para investigación futura en donde se plantea una función objetivo que varía en ciertos aspectos.

En el capítulo 3 se muestra la información que se obtuvo para poder trabajar con el caso de estudio del terremoto que ocurrió en Chile en el 2010, se muestran datos de distancias, precios de los cargamentos, países que participaron en los envíos de la ayuda, que organizaciones ayudaron con la distribución, las regiones afectadas, donde se ubicaron los centros de acopio, entre otras cosas que se utilizaron para poder resolver el problema.

El capítulo 4 muestra la experimentación computacional, se explica el ambiente computacional en el que se trabajó, se plantean los tres enfoques del modelo que se utilizaron para mostrar el equilibrio bi-nivel, y se muestran los resultados obtenidos de la experimentación.

En el capítulo 5 se muestran las conclusiones del trabajo, además de que se hacen algunas recomendaciones que se obtuvieron mediante la interpretación de los resultados de la experimentación y se muestra el trabajo a futuro.

La parte final de la tesis contiene un Apéndice en donde aparecen todas las tablas de datos que se manejaron en el caso de estudio y en la experimentación.

## 1.6 Programación Bi-nivel

Como ya se mencionó anteriormente, muchas situaciones reales involucran tomadores de decisiones en dos niveles los cuales están relacionados por una jerarquía preestablecida. El hecho de que exista esta jerarquía implica que el problema sea considerado dentro de la categoría de optimización multi-objetivo. El área que engloba a ese tipo de problemas se llama programación bi-nivel. En estos problemas se asume que a los tomadores de decisiones del nivel superior e inferior se les llama el líder y el seguidor, respectivamente.

Un modelo general de un problema de programación bi-nivel puede verse como el que fue propuesto por Bracken y McGill (1973):

$$\begin{aligned}
 & \min_{x \in X} F(x, y) \\
 & \text{subject to:} \\
 & \quad G(x, y) \leq 0 \\
 & \quad \min_{y \in Y} f(x, y) \\
 & \quad \text{subject to:} \\
 & \quad \quad g(x, y) \leq 0 \\
 & \quad \quad x, y \geq 0
 \end{aligned}$$

Como puede apreciarse en ese modelo, el líder intenta minimizar  $F(x, y)$  seleccionando una  $x \in X$  y considerando la mejor respuesta del seguidor,  $y^*(x)$ , que minimice  $f(x, y)$  en el problema del nivel inferior. También pueden considerarse restricciones funcionales  $G(x, y) \leq 0$  y  $g(x, y) \leq 0$  en cada uno de los dos niveles del problema. Estos problemas en general son no convexos y por lo tanto, son difíciles de resolver. Dempe (2002) expone muchas complicaciones específicas que pueden presentarse en estos problemas, establece algunas formas de analizarlas y de reducir el problema a uno de un solo nivel.

Como ya se mencionó, existe una amplia variedad de aplicaciones que han sido modeladas con programación bi-nivel y Vicente y Calamai (1994), Bard (1998), Colson et al. (2007) y Dempe et al. (2014) presentan revisiones de literatura sobre este punto.

## Capítulo 2

# Modelación del Problema

## 2.1 Planteamiento del Problema

El problema bi-nivel propuesto es el siguiente: cuando ocurre una catástrofe devastadora en alguna zona del mundo, muchos países y organismos internacionales envían ayuda al país afectado. El nivel superior, el país afectado (líder) debe elegir el medio de transporte y la forma de distribuir rápidamente los productos de ayuda. Se considera que existen varios puntos (centros de acopio) a donde puede llegar la ayuda y los lugares afectados que requieren ayuda demandarán algunos productos de manera prioritaria. Por último, en el nivel inferior, se asume que los países u organismos internacionales (seguidores) que envían ayuda deciden libremente a cual centro de acopio enviarlo de tal forma que se minimice el costo del envío, de forma general ambos problemas (nivel superior e inferior) parecen similares al problema de selección de proveedores (ver Sanayei et al. 2008), excepto por las decisiones interrelacionadas bajo una jerarquía determinada.

Este problema es innovador porque se considera por vez primera a la parte que brinda ayuda no solamente al país afectado. No es descabellado considerar que quienes envían ayuda están interesados en reducir los costos de sus acciones, lo que nos motiva a considerar el nivel inferior del problema propuesto.

El problema considerado está enfocado en la eficiente distribución de la ayuda en especie recibida en los centros de acopio. Dicha ayuda deberá distribuirse a las zonas afectadas de forma rápida y eficaz pero considerando que los países u organismos internacionales tratan de ayudar de tal forma que les sea menos costoso el envío.



## 2.2 Modelo Matemático

El modelo puede describirse como sigue: sean  $i \in I$  los países u organismos internacionales que ayuden al país afectado;  $j \in J$  son lugares específicos en donde se puede recibir la ayuda en especie dentro del país afectado (centros de acopio);  $k \in K$  son los lugares con necesidad urgente para recibir ayuda;  $l \in L$  denota un producto específico (agua potable, medicamentos, comida enlatada, ropa, papel, entre otros); y por último, sea  $m \in M$  el medio de transporte utilizado para enviar o distribuir los productos (terrestre, aéreo o marítimo).

Definamos  $t_{ijlm}^1$  como el tiempo que tarda en llegar un cargamento del producto  $l$  por el medio de transporte  $m$  desde el organismo de ayuda  $i$  hacia el centro de acopio  $j$ ; de manera similar sea  $t_{jklm}^2$  el tiempo que tarda en distribuirse un cargamento del producto  $l$  por el medio de transporte  $m$  desde el centro de acopio  $j$  hacia la zona afectada  $k$ . También se tendrá un volumen  $v_l$  que ocupa un cargamento del producto  $l$  y en cada centro de acopio  $j$  se cuenta con una capacidad de espacio limitada  $V_j$ . En cada zona afectada  $k$  se cuenta con una demanda conocida  $D_{kl}$  de cada artículo  $l$ , así como en cada país u organismo de ayuda  $i$  se tiene un máximo de ayuda disponible  $H_{il}$  de cada producto  $l$ . Por último, sea  $c_{ijm}$  el costo de enviar un cargamento por el medio de transporte  $m$  desde el organismo de ayuda  $i$  hacia el centro de acopio  $j$ .

Las variables de decisión para nuestro problema son:

$x_{ijlm}$  = cantidad de cargamentos del producto  $l$  enviados por el medio de transporte  $m$  desde el país u organismo de ayuda  $i$  hacia el centro de acopio  $j$ .

$y_{jklm}$  = cantidad de cargamentos del producto  $l$  distribuida por el medio de transporte  $m$  desde el centro de acopio  $j$  hacia la zona afectada  $k$ .

Entonces tenemos que el modelo resultante es como sigue

$$\min_{y_{jklm}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{ijlm}^1 x_{ijlm} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{jklm}^2 y_{jklm} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} v_l y_{jklm} \leq V_j, \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jklm} \geq D_{kl}, \quad \forall k \in K, l \in L \quad (3)$$

$$y_{jklm} \in Z^+ \cup \{0\} \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L, m \in M \quad (4)$$

$$x_{ijlm} \in \operatorname{argmin}_{\bar{x}_{ijlm}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c_{ijm} \bar{x}_{ijlm} \quad (5)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \bar{x}_{ijlm} = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jklm}, \quad \forall j \in J, l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \bar{x}_{ijlm} \leq H_{il}, \quad \forall i \in I, l \in L \quad (7)$$

$$\bar{x}_{ijlm} \in Z^+ \cup \{0\}, \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (8)$$

El problema binivel está definido por (1)-(8). En (1) se presenta la función objetivo del nivel superior y se aprecia que el líder quiere minimizar el tiempo total de respuesta para distribuir la ayuda, esto es, el tiempo necesitado para enviar desde el organismo de ayuda  $i$  hacia el centro de acopio  $j$  y de ahí hacia la zona afectada  $k$ . Se considera que no hay restricciones sobre el número de vehículos disponibles para el envío de la ayuda, también asumimos que los vehículos pueden partir del origen en forma simultánea. En (2) se tiene una restricción de espacio disponible en cada centro de acopio  $j$ ; en (3) se tiene que satisfacer la demanda necesitada para cada producto  $l$  en cada zona afectada  $k$  y la restricción (4) restringe a que el número de embarques de cada producto tiene que ser no negativo.

La restricción (5) es la que convierte este problema en uno de programación binivel. Esta restricción implica que las variables  $x_{ijlm}$  deben ser la solución óptima del problema (5)-(8). A (5) se le conoce como la función objetivo del nivel inferior e indica que se quiere minimizar el costo de enviar la ayuda de parte del organismo de ayuda  $i$  hacia el centro de acopio  $j$ . La ecuación (6) dice que se debe de enviar solamente lo requerido para cada centro de acopio  $j$  de cada producto  $l$ . La expresión (7) asegura que un país u organismo de ayuda  $i$  no puede enviar más de una cantidad disponible del producto  $l$  y (8) señala la no negatividad para los embarques de cada producto desde el organismo de ayuda  $i$  hacia el centro de acopio  $j$ .

Para que un problema bi-nivel está bien definido se debe establecer que va a pasar en el caso de que existan múltiples soluciones óptimas en el nivel inferior para una decisión hecha por el líder, nosotros consideraremos la versión optimista de programación bi-nivel.

En otras palabras, cuando el seguidor tiene más de una solución óptima para la decisión del líder predefinida, el seguidor tomará su decisión de tal forma que también sea la más conveniente para el líder. En este caso, si un país puede enviar

ayuda a dos centros de almacenamiento diferentes con el mismo costo, el país tomará la decisión que esté asociada al menor tiempo de envío.

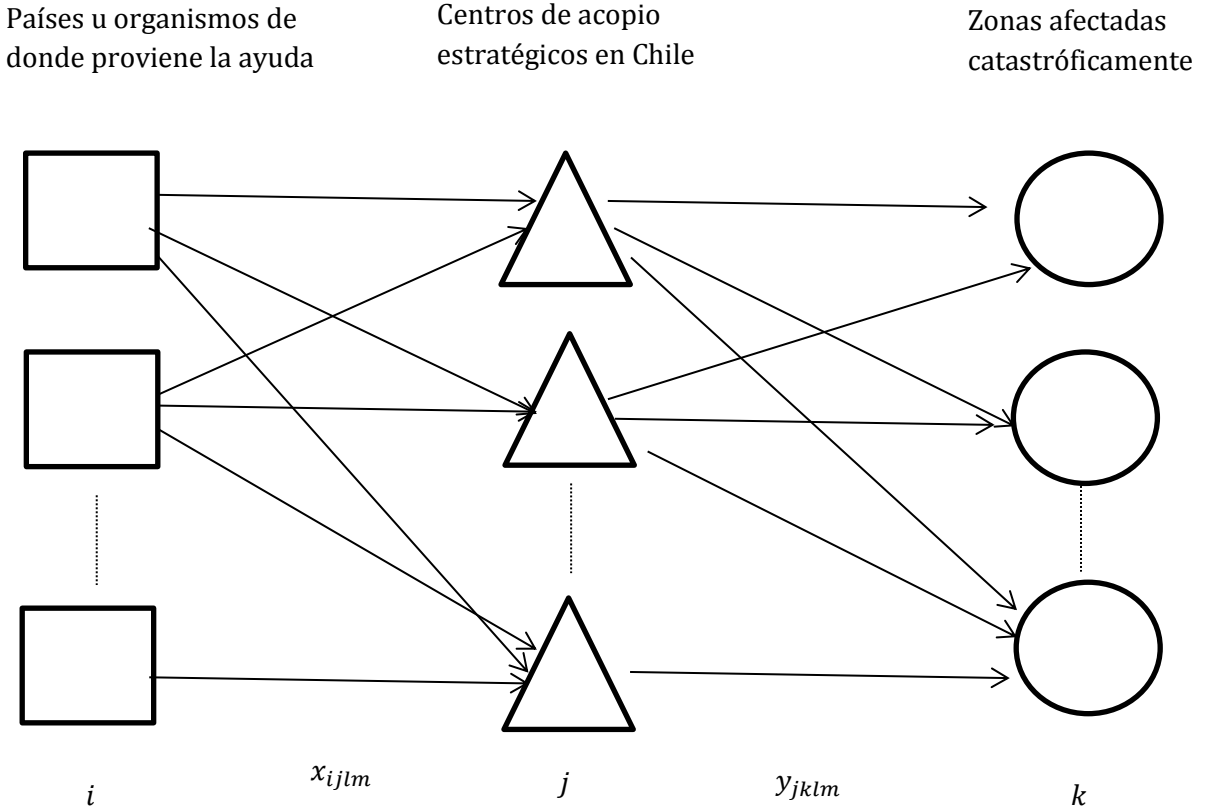
En este trabajo asumimos que se conocen tanto las zonas afectadas, la ubicación de los centros de acopio y los organismos que están disponibles para ayudar. Además con el apoyo de las conclusiones que se formularon en Schilephake et al. (2009), donde se comenta sobre la importancia de las buenas relaciones entre las partes involucradas en la cadena de suministro para encontrar soluciones más eficientes con mayor ahorro de costos, se supone la existencia de un organismo central de coordinación de estos países y/u organismos de ayuda para evitar el envío de ayuda innecesaria y destinar recursos para trabajar de forma más eficiente. Este supuesto le ayudará a mostrar la importancia de contar con un organismo central para que coordine totalmente el proceso, en lugar de que cada país considere el envío de la ayuda sin tener comunicación con los demás.

Como se mencionó anteriormente, también asumimos que no tenemos restricciones sobre el número de vehículos disponibles para la distribución de la ayuda. En situaciones reales el número de medios de transporte disponibles para enviar la ayuda es limitado, pero suficiente para cumplir con la gran demanda, debido al pequeño número de vehículos necesarios, por lo que este supuesto también parece razonable y común en la logística humanitaria. Si no hay suficientes vehículos disponibles, la demanda puede permanecer insatisfecha, provocando situaciones no deseadas. Se tiene en cuenta que los mismos tipos de vehículos tendrán la misma capacidad; es decir, todos los aviones tendrán la misma capacidad, no necesariamente igual que la capacidad de los barcos y la de los camiones.

El esquema del modelo es: El líder (país afectado) decide cómo distribuir la ayuda desde los centros de acopio hacia los lugares necesitados, esto es, fija las  $y_{jklm}$ . Debido a esto, se conjunta una demanda conocida de cada producto  $l$  que el país afectado está solicitando en cada centro de acopio  $j$ . Basado en esa demanda, una organización humanitaria trata de coordinar a los demás países u organismos de ayuda que quieran participar enviando los embarques de ayuda de tal forma que minimicen el costo de envío y se cumplan con las condiciones de demanda. Esto es, se deciden las  $x_{ijlm}$ . Ahora con las  $y_{jklm}$  y  $x_{ijlm}$  el líder evalúa su función objetivo para minimizar el tiempo de distribución que requiere para enviar a las zonas afectadas  $k$ .

El modelo considerado en este trabajo es similar a la cadena de suministro de varias etapas clásica donde lo que se pretende es minimizar tanto (1) los costos de transporte entre plantas y centros de distribución y (2) el costo de distribución incurridos desde los centros de distribución a los clientes, pero comúnmente las funciones objetivo en la logística humanitaria no están interesados en minimizar los costos.

El diagrama del modelo aparece en la Figura 1:



## 2.3 Reformulación del Modelo

En esta sección nosotros reformulamos el problema de programación binivel a un problema de programación no lineal de un solo nivel. Es fácil notar que si fijamos las variables  $y_{jklm}$  del problema binivel (1)-(8), el problema del nivel inferior (5)-(8) se convertirá en un problema de transporte y debido a la unimodularidad de la matriz relacionada con las restricciones, nuestras soluciones van a resultar números enteros si los lados derechos son enteros, entonces podemos relajar la restricción de las variables del nivel inferior para  $x_{ijlm} \geq 0$ . Por lo tanto el problema del nivel inferior puede ser reemplazado por las condiciones primal-dual. Se define  $\alpha_{jl}, \forall j \in J, l \in L$  y  $\beta_{il}, \forall i \in I, l \in L$  como las variables duales correspondientes a las restricciones (6) y (7) respectivamente.

El problema dual asociado con el nivel inferior está formado por:

$$\max_{\alpha_{jl}, \beta_{il}} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \left( \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jklm} \right) \alpha_{jl} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} H_{il} \beta_{il} \quad (9)$$

sujeto a :

$$\alpha_{jl} + \beta_{il} \leq c_{ijm}, \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (10)$$

$$\alpha_{jl} \text{ urs}, \quad \forall j \in J, l \in L \quad (11)$$

$$\beta_{il} \leq 0, \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L \quad (12)$$

Siguiendo con la teoria existente para la reducci3n en programaci3n binivel, consideramos las restricciones de holgura complementaria. Por lo tanto obtenemos un problema de programaci3n no lineal de un solo nivel:

$$\min_{y_{jklm}, x_{ijlm}, \alpha_{jl}, \beta_{il}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{ijlm}^1 x_{ijlm} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{jklm}^2 y_{jklm} \quad (13)$$

sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} v_l y_{jklm} \leq V_j, \quad j \in J \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jklm} \geq D_{kl}, \quad k \in K, l \in L \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijlm} = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jklm}, \quad j \in J, l \in L \quad (16)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijlm} \leq H_{il}, \quad i \in I, l \in L \quad (17)$$

$$\alpha_{jl} + \beta_{il} \leq c_{ijm}, \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (18)$$

$$x_{ijlm} (c_{ijm} - \alpha_{jl} - \beta_{il}) = 0, \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (19)$$

$$\beta_{il} \left( H_{il} - \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijlm} \right) = 0, \quad i \in I, l \in L \quad (20)$$

$$y_{jklm} \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}, \quad j \in J, k \in K, l \in L, m \in M \quad (21)$$

$$x_{ijlm} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (22)$$

$$\beta_{il} \leq 0, \quad i \in I, l \in L \quad (23)$$

La restricci3n (13) es la funci3n objetivo del problema no lineal de un solo nivel. Las restricciones (14)-(17), (21) y (22) nos proporcionan la factibilidad primal. Las restricciones (18) y (23) nos aseguran la factibilidad dual. Finalmente, las restricciones (19) y (20) nos garantizan el logro del valor 3ptimo para el problema del nivel inferior; sin embargo tambi3n se pierde linealidad en el modelo reformulado.

Ahora vamos a linealizar las restricciones (19) y (20), Primero para la (20) consideramos las variables auxiliares  $\gamma_{ijlm} \in \{0,1\}$  y hacemos M una constante positiva

suficientemente grande. Ya que  $x_{ijlm} \geq 0$  y  $c_{ijm} - \alpha_{jl} - \beta_{il} \geq 0$ , necesitamos agregar el siguiente conjunto de restricciones:

$$x_{ijlm} \leq M(1 - \gamma_{ijlm}) \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (24)$$

$$c_{ijm} - \alpha_{jl} - \beta_{il} \leq M\gamma_{ijlm} \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (25)$$

De forma similar linealizamos la ecuación (20). Sean  $\delta_{il} \in \{0,1\}$  unas variables auxiliares y considerando que  $\beta_{il} \leq 0$  y  $H_{il} - \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijlm} \geq 0$ , la linealización correspondiente para las restricciones serían:

$$\beta_{il} \geq -M\delta_{il} \quad i \in I, l \in L \quad (26)$$

$$H_{il} - \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijlm} \leq M(1 - \delta_{il}) \quad i \in I, l \in L \quad (27)$$

Finalmente la reformulación del modelo a un solo nivel mixto-entero queda como se muestra a continuación:

$$\min_{y_{jklm}, x_{ijlm}, \alpha_{jl}, \beta_{il}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{ijlm}^1 x_{ijlm} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{jklm}^2 y_{jklm} \quad (28)$$

sujeto a :

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} v_l y_{jklm} \leq V_j, \quad j \in J \quad (29)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jklm} \geq D_{kl}, \quad k \in K, l \in L \quad (30)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijlm} = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jklm}, \quad j \in J, l \in L \quad (31)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijlm} \leq H_{il}, \quad i \in I, l \in L \quad (32)$$

$$\alpha_{jl} + \beta_{il} \leq c_{ijm}, \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (33)$$

$$x_{ijlm} \leq M(1 - \gamma_{ijlm}) \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (34)$$

$$c_{ijm} - \alpha_{jl} - \beta_{il} \leq M\gamma_{ijlm} \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (35)$$

$$\beta_{il} \geq -M\delta_{il} \quad i \in I, l \in L \quad (36)$$

$$H_{il} - \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijlm} \leq M(1 - \delta_{il}) \quad i \in I, l \in L \quad (37)$$

$$y_{jklm} \in Z^+ \cup \{0\}, \quad j \in J, k \in K, l \in L, m \in M \quad (38)$$

$$x_{ijlm} \in Z^+ \cup \{0\}, \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (39)$$

$$\beta_{il} \leq 0, \quad i \in I, l \in L \quad (40)$$

$$\gamma_{ijlm} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (41)$$

$$\delta_{il} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, l \in L \quad (42)$$

Otra forma para reducir el problema binivel a uno de un solo nivel es removiendo las ecuaciones (19) y (20) y considerando el equilibrio de la función objetivo para el problema del nivel inferior y el valor correspondiente para su problema dual:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c_{ijm} x_{ijlm} = \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} (\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jklm}) \alpha_{jl} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} H_{il} \beta_{il} \quad (43)$$

El problema resultante es (13)-(18), (21)-(23) y (43) pero es claro notar que la restricción (43) nos hace perder linealidad en el modelo y no es tan sencillo linealizarla, como en el otro caso aquí descrito.

Además, se puede apreciar que se introducen dos conjuntos adicionales de variables.  $|\cdot|$  denota la cardinalidad de un conjunto en particular. Por lo tanto, se añaden  $|I||J||L||M| + |I||L|$  variables binarias en total. Además, el modelo mixto entero de un solo nivel cuenta con  $|I||J||L||M| + |I||L|$  más restricciones que el modelo de programación no lineal de un solo nivel. En cualquier caso, linealizar el modelo permite resolver con el optimizador CPLEX. Si esta linealización fuera posible, necesitaríamos un algoritmo heurístico para resolver el modelo no lineal.

## 2.4 Otra forma de mostrar el Modelo

El modelo también se podría resolver modificando la función objetivo de esta forma:

$$\min_{y_{jklm}, x_{ijlm}, \alpha_{jl}, \beta_{il}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} T_{ijlm}^1 + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} T_{jklm}^2 \quad (44)$$

donde, las variables auxiliares  $T_{ijlm}^1$  y  $T_{jklm}^2$  son definidas como sigue:

$$T_{ijlm}^1 = \begin{cases} t_{ijlm}^1 & \text{si } x_{ijlm} \geq 1 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad \text{y} \quad T_{jklm}^2 = \begin{cases} t_{jklm}^2 & \text{si } y_{jklm} \geq 1 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

No se toma en cuenta el tiempo entre las salidas. Por lo tanto teniendo en cuenta (44) como la función objetivo, el tiempo de respuesta total se interpreta como el tiempo hasta que llegue la ayuda, la definición de  $T_{ijlm}^1$  y  $T_{jklm}^2$  implica que, por cada medio de transporte, si por lo menos un solo vehículo es enviado para ayudar al país necesitado, el tiempo asociado será considerado en la función objetivo sin relacionarse con la cantidad de vehículos enviados. Otras funciones objetivo pueden adaptarse a este modelo (por ejemplo, la reducción al mínimo de las sanciones por retrasos en las entregas, la demanda insatisfecha, el sufrimiento humano y los factores de peso).

En este modelo, la función objetivo necesita ser tratada cuidadosamente cuando se resuelve el problema debido a la definición de  $T_{ijlm}^1$  y  $T_{jklm}^2$ .

## Capítulo 3

### Caso de Estudio

Para ilustrar la importancia del modelo propuesto en esta tesis, se aplicó a un caso de estudio del terremoto ocurrido en Chile en el 2010.

#### 3.1 Análisis del Terremoto en Chile ocurrido en 2010

Consideramos que existe un grupo de países que envían ayuda a Chile en términos de productos básicos para hacer frente al evento en las zonas más afectadas. Para ello, los países tienen que decidir los medios de transporte a utilizar para el envío de los productos, los cuales son canalizados a un conjunto de centros de acopio que se han instaurado en las zonas más afectadas, desde donde la ayuda internacional es



distribuida entre los afectados. Los países desean minimizar los costos asociados a la distribución de los productos, y por otra parte, los afectados desean recibir los productos lo más rápido posible. Dada la magnitud del evento, consideraremos que la demanda de productos corresponde a un horizonte temporal de 10 semanas, que son las necesarias para la primera etapa de recuperación de la catástrofe. Por lo tanto, la pregunta de investigación consiste en determinar la configuración de los envíos de ayuda internacional hacia los puntos de demanda tal que se minimicen los costos y los productos se distribuyan lo más rápido posible en las zonas afectadas.

Para generar la instancia del problema, se realizó una búsqueda de información en fuentes secundarias, tales como notas de prensa e informes de organismos como la ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia) de Chile y algunas ONG (i.e. Cruz Roja, Un Techo para Chile, etc.)

Particularmente consideramos que los siguientes 12 países enviaron ayuda a Chile:

1. Alemania
2. Argentina
3. Bolivia
4. Brasil
5. Colombia
6. Cuba
7. Ecuador
8. Estados Unidos
9. España
10. México
11. Perú
12. Venezuela

Para el envío de la ayuda internacional, los países pueden realizarlo por modo aéreo, marítimo y terrestre. En el modo terrestre, se considera solo para aquellos países frontera con Chile, que en este caso serían Perú, Bolivia y Argentina. Por otra parte, se asume que todos los envíos se hacen desde un mismo punto en cada país por cada modo de transporte, ya sea de uno de los principales aeropuertos, de un puerto marítimo o bien desde una de las principales ciudades respectivamente por cada modo de transporte. En la Tabla 1 (se encuentra en el Apéndice) se detalla la información referente a los orígenes desde donde se realizan envíos por cada país.

Dada la disponibilidad de información, asumiremos para el caso de Cuba que los envíos por modo marítimo se realizan a través del Puerto de Jamaica, y para el caso de Venezuela los envíos se realizan por el Puerto de Cartagena.

A su vez, en el país destino, en este caso Chile, consideraremos que toda la ayuda llega a la sede del Grupo 10 de las Fuerzas Armadas (FACH) ubicada en Pudahuel, Santiago (al lado del aeropuerto internacional de Santiago), que fue donde efectivamente la gran mayoría de la carga fue recibida. Se asume una capacidad infinita de la sede de la FACH, ya que es el centro de acopio más grande y la demanda no sobrepasa su capacidad. De ahí, se hace llegar hacia los centros de acopio y después a los puntos de demanda vía terrestre. Para el caso de los envíos por modo marítimo, se asumirá que toda la ayuda llega al Puerto de Valparaíso, que es uno de los principales puertos de Chile junto con el Puerto de San Antonio y está ubicado en la Zona Central y cerca de las regiones más afectadas. El Puerto de San Antonio no fue considerado dado que producto del mismo terremoto sufrió algunos daños. Se asume también una capacidad infinita del puerto de Valparaíso, dado que es un puerto que moviliza alrededor de 1 millón de **TEUs al año**, donde un TEU es la unidad clásica de medida usada en Chile, por lo tanto tiene capacidad suficiente. Desde el Puerto de Valparaíso, la carga es distribuida al centro de acopio correspondiente por modo terrestre. Finalmente, en el caso de los envíos terrestres, se considera que estos son dirigidos directamente hasta el centro de acopio correspondiente desde la ciudad origen del país.

La operación de los centros de acopio estuvo a cargo de diversas ONG (Un Techo para Chile, Caritas, Cruz Roja) así como federaciones de estudiantes de diversas universidades, donde se recopiló la ayuda tanto internacional como nacional. En particular para este caso de estudio consideraremos que los centros de acopio son de uso exclusivo para un tipo de ayuda y consideramos solo aquellos que se utilizan para la ayuda internacional. Dado que no existen estudios precisos de la ubicación de estos centros de acopio, se considera el supuesto de que estos se definieran con base en la estructura de Chile, que está dividido en 15 Regiones, donde cada Región está constituida por un número de provincias y cada provincia por un número de comunas. Asumiremos que los centros de acopio son instalados en función de las provincias de

las regiones más afectadas con el terremoto. Para el caso de la Región Metropolitana asumiremos que se instalan dos centros de acopio y para el resto de las regiones se instala un centro por cada provincia. Estos centros de acopio satisfacen la demanda de 2 a 4 comunas, que son consideradas los puntos de demanda y pudieran representar demanda agregada de la comuna y otras comunas aledañas más pequeñas.

Las regiones más afectadas con el terremoto y el tsunami corresponden a la Zona Central Sur del país son en total 6, las cuales estuvieron más cerca del epicentro del terremoto y tuvieron un mayor grado de afectación:

- Región Metropolitana de Santiago, donde Santiago y la zona metropolitana fueron las más afectadas
- Región de Valparaíso, donde la zona más afectada fue en el archipiélago de Juan Fernández, seguido por la provincia de Valparaíso y San Antonio.
- Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Toda la región se declaró en estado de catástrofe.
- Región del Maule, con toda la región en estado de catástrofe
- Región del Bío-Bío, con toda la región en estado de catástrofe
- Región de la Araucanía, con severos daños pero en menor grado que las regiones del Maule y Bío-Bío.

De acuerdo con las provincias de las 6 regiones más afectadas, se instalaron en total 17 centros de acopio. De cada centro de acopio, la ayuda es distribuida hacia las comunas más afectadas. La capacidad de los centros de acopio se define de manera proporcional a la población de la provincia y su demanda de productos. En total se consideran 44 puntos de demanda, los cuales como se mencionó anteriormente, consideran una demanda agregada de la comuna y otras comunas aledañas de manera que todas las comunas de la provincia son cubiertas.

De acuerdo con la intensidad de la escala Richter del terremoto en cada región y los reportes en términos de los daños ocasionados por el terremoto, se estimó la población damnificada de cada comuna y las comunas aledañas que agrupa. De acuerdo con registros de la ONEMI, el total de población se estima en dos millones. Estos dos millones de afectados se distribuyeron en las comunas de las regiones más afectadas, considerando un mayor porcentaje de la población afectada en la Región del Maule, del Bío-Bío asumiendo en estas regiones que el 50% de la población resultó damnificada, junto con el archipiélago Juan Fernández de la Región de Valparaíso que resultó también bastante dañada producto del tsunami y se asume que el 65% de la población fue damnificada. Después está la Región del Libertador Bernardo O'Higgins con un 20% de la población damnificada, la Región de Valparaíso que dependiendo de la provincia tiene un porcentaje de afectación entre 5 y 15%; para la Región de la

Araucanía se asume un 10% de población damnificada y para la Región Metropolitana que es la que concentra la mayor población, se asume un 4% de afectación. La capacidad de los centros de acopio en cada provincia considera una capacidad dinámica para poder atender la demanda correspondiente a 10 semanas de la población afectada de las comunas correspondientes a esa provincia más una holgura de 100 unidades, dado que partimos del supuesto que existe capacidad suficiente en los centros de acopio para recibir la ayuda internacional.

En términos de los productos, se consideraron 4 categorías: Líquidos (agua potable, leche), Alimentos no perecederos (Arroz, Azúcar, Aceite), Productos personales (productos de higiene, pañales, ropa, cobijas, velas, pilas) y Medicamentos. Para el horizonte temporal de 10 semanas, se consideraron 2 tipos de kits básicos por persona damnificada. El Kit-1 consiste de alimentos y líquidos para una persona con una duración de una semana, por lo cual contiene 7 unidades de cada producto tanto productos líquidos como alimentos no perecederos. El Kit-2 consiste de productos personales y medicamentos, con 4 unidades de cada tipo que resultaran suficientes para cubrir 2.5 semanas. Por lo tanto, para el horizonte temporal de 10 semanas, se tendrá una demanda de 10 Kit-1 y 4 Kit-2. De esta manera, la demanda total de cada kit se estima en función de la población de cada comuna afectada.

La Tabla 2 (se encuentra en el Apéndice) presenta la ubicación de los centros de acopio con sus respectivas capacidades medidas en pallets ( $1m^3$ ), las comunas o puntos de demanda, la población afectada de cada comuna y la demanda de los Kit-1 y Kit-2 por cada comuna afectada.

Para estimar la demanda de cada uno de los 4 tipos de productos, asumiremos que estos se movilizan en pallets ( $1m^3$ ). Dada la demanda de los Kits y los productos que pertenecen a cada Kit, se estima la demanda de cada producto en pallets. Para el Kit-1, asumimos que para el caso de los líquidos, 7 unidades corresponden a 10 litros, para los alimentos no perecibles, 7 unidades equivalen a 1.5 kilogramos. Para el Kit-2 asumimos que 4 unidades corresponden a 1 kilogramo y para los medicamentos 4 unidades requieren 0.20 kilogramos. De aquí se estima la cantidad de litros y kilogramos demandados, y estos se transforman a pallets, donde 1 pallet es equivalente a 1000 litros y 1000 kilogramos. Las demandas totales de cada producto en pallets, junto con los cálculos necesarios para determinarlas, se presentan en la Tabla 3 (se encuentra en el Apéndice)

Asumimos que los países tienen una capacidad de enviar productos suficiente para satisfacer la demanda de productos de los puntos afectados, con una holgura de cada tipo de producto (1000 unidades para líquidos, 500 unidades para alimentos no perecibles, 200 unidades para productos personales y 100 unidades para

medicamentos por cada país). La disponibilidad de envíos está en función del nivel de economía del país, que a grosso modo se catalogó como baja, media y alta, tal como se presenta en la Tabla 4 (se encuentra en el Apéndice).

En lo que respecta a los costos y tiempos de envíos, estos fueron estimados en función del modo de transporte y el tramo respectivo. Para los envíos por modo terrestre se tomó como base el costo de un flete desde Santiago a Valparaíso que cuesta 400 dólares por contenedor (1 TEU), donde 1TEU= 30 pallets. Dado que la distancia de este flete es de 120 kilómetros, de ahí se estima un costo de 0.111 dólares por pallet y por kilómetro. De esta manera, los costos de envíos terrestres se calculan en función de la distancia recorrida entre cada tramo. Por otra parte, para los envíos por modo marítimo, se pudo conseguir el costo por flete de un viaje desde Barcelona a Valparaíso que fue de 4.900€ por TEU, de ahí fue posible estimar el costo por pallet. Asumiendo que 1 Euro=1.28 dólares se hizo la conversión necesaria para determinar el costo en dólares por pallet. El resto de los costos para envíos de cada país se determinó de manera proporcional a los kilómetros recorridos. Igualmente para los envíos por modo aéreo, se pudo verificar que un costo comercial aproximado de un envío desde Barcelona a Santiago es de 4,900 € por pallet. El resto de costos se estima de manera proporcional a la distancia recorrida. Para ambos modos aéreo y marítimo, es necesario incorporar el costo de envío terrestre desde la sede de la FACH en Santiago y del Puerto de Valparaíso respectivamente, la cual se calcula con la tarifa terrestre por kilómetro previamente definida. Los costos de envíos se presentan en las tablas 5, 6 y 7 (se encuentran en el Apéndice) para los modos aéreo, marítimo y terrestre respectivamente, donde dicho costo incluye también el costo de traslado terrestre hacia el centro de acopio.

Los tiempos de traslado consideran el tiempo de recorrido, así como una estimación de los tiempos necesarios para cargar y descargar el producto y la tramitación aduanera y los tiempos en los cruces fronterizos. Asumimos que para los tiempos de recorrido terrestre, se considera el tiempo de traslado en función de la distancia recorrida más 2 días por tramitaciones. Para los tiempos de recorrido nacionales se considera únicamente los tiempos por traslado asumiendo que no hay necesidad de trámites aduaneros ni controles fronterizos. Los tiempos de recorrido aéreos suman 20 horas por tramitaciones adicionales a los tiempos de recorrido por distancia. Los tiempos de recorrido marítimo se estimaron en función de la duración de un traslado comercial que incluye ya todos los tiempos de tramitaciones (caso del envío de Barcelona a Valparaíso) y de ahí se estimó de manera proporcional para el resto de países. Las tablas 8, 9 y 10 (se encuentran en el Apéndice) presentan los tiempos por modo aéreo, marítimo y terrestre.

Desde los Centros de Acopio, los costos de distribución se consideran en función de la distancia recorrida hacia las comunas o puntos de demanda, todo por modo terrestre. En la Tabla 11 (se encuentra en el Apéndice) se presenta dichos costos, junto con los tiempos de traslado.

## Capítulo 4

# Experimentación Computacional

En esta sección se describe la experimentación computacional que se llevó a cabo para analizar el caso de estudio. Para poder dar algunas recomendaciones sobre la situación modelada en esta tesis, se propone una comparación entre tres modelos diferentes cada uno con un punto de vista distinto a los otros, pero teniendo en cuenta la misma situación.

### 4.1 Ambiente Computacional

En esta sección vamos a describir el entorno computacional y la metodología utilizada. El tamaño de la instancia obtenido a partir del caso de estudio se define por  $|I| = 12$ ,  $|J| = 17$ ,  $|K| = 44$ ,  $|L| = 4$  y  $|M| = 3$ . Los tres esquemas diferentes del caso de estudio se resolvieron de forma exacta con CPLEX 12.1 a través de un código C++ utilizando una computadora con un Procesador Dual-Core de 3.00GHz con 2.00 GB de RAM corriendo en un sistema operativo de Windows 7 Professional. Para resolver el modelo binivel se utilizó una reformulación equivalente a la mostrada en la sección 2.4. El detalle de los valores de todo lo que hemos utilizado para la experimentación de este caso de estudio aparece en las tablas que se encuentran en el apéndice.

### 4.2 Tres distintos enfoques

Para poder dar recomendaciones sobre los resultados que obtuvimos de nuestro modelo, proponemos tres modelos distintos desde enfoques diferentes con los que podemos hacer comparaciones con nuestro *Modelo Bi-nivel*.

Nos referimos al primero modelo como la *Perspectiva del Líder*, que consiste en resolver el problema de la recepción y distribución de la ayuda sin tener en cuenta la opinión de los países que ayudan; esto significa que la función objetivo del problema consiste en minimizar tanto el tiempo requerido para recibir la ayuda de los países

como el tiempo de ayuda incurrido mediante la distribución de los productos a las zonas afectadas.

La función objetivo de este modelo sería:

$$\min_{x_{ijlm}, y_{jklm}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{ijlm}^1 x_{ijlm} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{jklm}^2 y_{jklm}$$

sujeta a las restricciones dadas por (2)-(4) y (6)-(8). Bajo este esquema, sólo el tiempo de envío, recepción y distribución determinan todas las decisiones.

El segundo modelo es llamado la *Perspectiva del Seguidor*, tiene una descripción similar a la primera. En este modelo, asumimos que los países que envían la ayuda deciden toda la logística en el área afectada. En otras palabras, el tiempo de distribución no va a ser el objetivo principal del problema; en cambio, el objetivo es la minimización del costo de envío. Este modelo considera la función objetivo definida por:

$$x_{ijlm} \in \operatorname{argmin}_{\bar{x}_{ijlm}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c_{ijm} \bar{x}_{ijlm}$$

sujeta a las restricciones dadas por (2)-(4) y (6)-(8). Bajo este esquema, sólo los costos monetarios determinan todas las decisiones.

Naturalmente, ninguno de los modelos descritos anteriormente modelan con gran precisión la situación real que ocurre después de un desastre natural. Los modelos de la *Perspectiva del Líder* y la *Perspectiva del Seguidor* nos dan las situaciones extremas, si no lo consideramos como un problema de programación binivel.

En el modelo binivel definido por (1)-(8), se tiene en cuenta las decisiones tanto del líder como del seguidor para la selección de sus mejores decisiones, por lo que esperan encontrar el equilibrio entre ellos, considerando una jerarquía en el proceso de decisión.

## 4.3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la experimentación que se hizo sobre el caso de estudio del terremoto que ocurrió en Chile en el 2010 con el modelo de la sección 2.4.

En la Tabla 12, se presentan los resultados numéricos; mostramos el valor de la función objetivo del líder  $F(x, y)$  que representa el tiempo total (en horas) para la distribución de la ayuda de todos los países a los centros de acopio y luego a las zonas

afectadas, el valor de la función objetivo del seguidor  $f(x, y)$  que representa los costos (en dólares) asociados a la distribución de la ayuda, y el tiempo  $t$  (en segundos). Para resolver los tres modelos (Perspectiva del Líder, Perspectiva del Seguidor y Modelo Binivel) se hizo uso del ambiente computacional mencionado anteriormente.

El plan de distribución  $y$  y la decisión  $x$  para el envío de la ayuda a Chile, aparecen en el Apéndice.

	$F(x, y)$	$f(x, y)$	$t$
Perspectiva del Líder	3,885.30	430,777,152	0.0936
Perspectiva del Seguidor	347,310.90	359,936,842	0.1560
Modelo Binivel	12,355.02	369,710,950	11.5129

Tabla 12. Resultados Numéricos para el caso de estudio.

Como se observa en la Tabla 12, resulta un equilibrio jerárquico en el Modelo Binivel para los países que envían la ayuda (seguidor) y el país afectado (líder), es decir,  $F_{Líder} < F_{Binivel} < F_{Seguidor}$  y  $f_{Seguidor} < f_{Binivel} < f_{Líder}$ , donde el subíndice representa al modelo correspondiente. En otras palabras, bajo la Perspectiva del Líder obtenemos un plan de distribución de la ayuda más rápido pero muy costoso para los países que envían la ayuda. Mientras tanto, teniendo en cuenta la *Perspectiva del Seguidor*, la solución del problema nos dio el plan más barato para el envío de la ayuda pero lo peor en relación a la necesaria distribución de los productos. Por otro lado, el *Modelo Binivel* nos permitió llegar a un punto intermedio, teniendo en cuenta que el país afectado tiene una jerarquía justificada en el problema.

En la figura 2, aparece una representación gráfica del punto óptimo para la solución binivel.



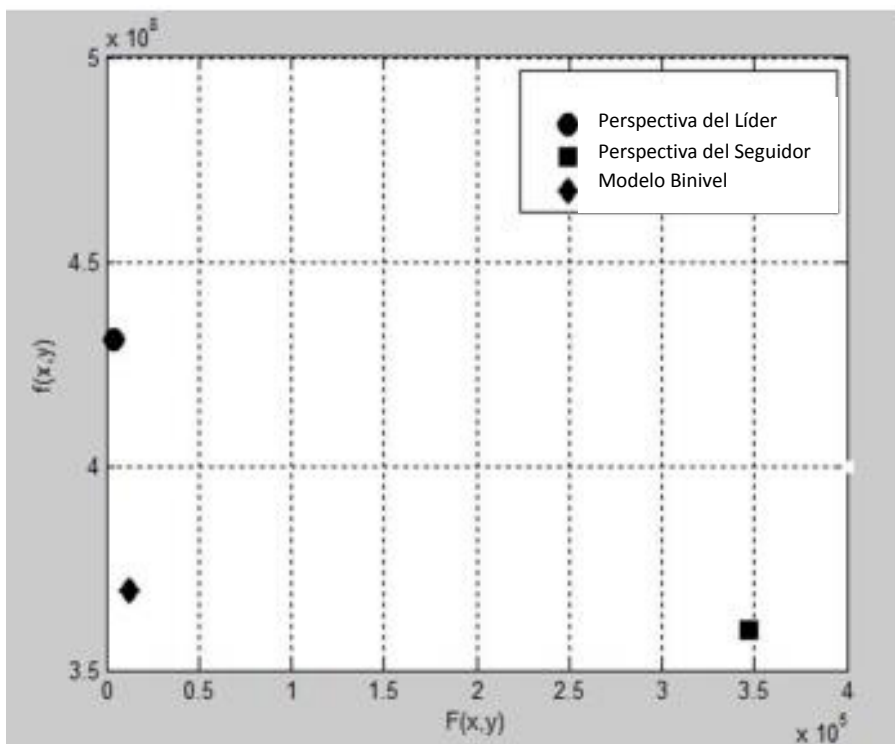


Figura 2. Ilustración gráfica del equilibrio bi-nivel.

La jerarquía considerada en este trabajo aparece en la Tabla 13 donde hacemos dos comparaciones. Primero, comparamos el incremento en el tiempo de distribución con respecto al valor dado por el modelo de la Perspectiva del Líder; y segundo, identificamos el costo asociado con la distribución del envío para el país devastado dado por el modelo de la Perspectiva del Seguidor y comparamos con el incremento en los costos dados por los otros modelos.

La siguiente fórmula nos da la diferencia en el incremento:

$$\% \text{ Incremento} = \frac{(\text{Valor actual}) - (\text{Mejor valor})}{(\text{Mejor valor})} \quad (45)$$

	Incremento en el Tiempo (%)	Incremento en los costos (%)
<i>Perspectiva del Líder</i>	-	19.681
<i>Perspectiva del Seguidor</i>	8,839.101	-
<i>Modelo Bi-nivel</i>	217.994	2.716

Tabla 13. Porcentaje del incremento en los respectivos modelos contra la mejor decisión.

El equilibrio obtenido después de resolver el Modelo Binivel aumenta ambos objetivos (tiempo y costos); este resultado era esperado debido a la jerarquía existente entre ambos niveles. Debido a la naturaleza del modelo, si consideramos el problema del

seguidor (la minimización de los costos asociados con el envío de ayuda al país afectado) afecta claramente el tiempo de respuesta total, pero permite tomar en consideración la opinión de los países que ayudan.

Para mostrar las ventajas del *Modelo Binivel* propuesto, calculamos la holgura en el ahorro que ofrece este modelo frente a la *Perspectiva del Líder* y la *Perspectiva del Seguidor*. La holgura aparece en la Tabla 3 y se deriva de la fórmula (45) ajustando los valores en la forma correcta.

	Disminución en el tiempo (%)	Disminución en los costos (%)
<i>Perspectiva del Líder</i>	-68.553	16.517
<i>Perspectiva del Seguidor</i>	2,711.092	-2.644
<i>Modelo Binivel</i>	-	-

Tabla 14. Porcentaje de la disminución dada por el Modelo Binivel

Como se muestra en la Tabla 14, mediante la selección de la solución binivel en lugar de la solución de la *Perspectiva del Líder*, reducimos los costos totales un 16.517%. Por otra parte, la elección de la solución binivel en lugar de la *Perspectiva del Seguidor* nos da una enorme reducción en el tiempo de 2,711.092%. En ambos casos las reducciones son más significativas que el aumento mostrado en la Tabla 13. Los valores negativos en la Tabla 14 representan el incremento total en los tiempos y costos respectivamente.

Refiriéndonos a las soluciones presentadas en el Apéndice, en el escenario binivel los 12 países envían ayuda. Los envíos se producen por los medios de transporte aéreo y marítimo; sólo Argentina utiliza el transporte terrestre. Estados Unidos envía la mayor cantidad de ayuda con 249.060 TEU, mientras que Alemania sólo envía 59.160 TEU, lo que lo hace el país que menos ayuda manda. Vale la pena mencionar que Bolivia, Ecuador, Cuba y Venezuela envían la misma cantidad de 84.220 TEU. Por otro lado, con respecto a la distribución interna en Chile, todas las zonas afectadas cumplen su demanda con los 17 centros de acopio existentes, es decir, todos los centros de acopio se utilizan y todo se distribuyó por modo terrestre.

El tiempo total requerido es igual a la suma de todos los tiempos de distribución y envío. Estos envíos pueden ocurrir de manera simultánea sin tomar en cuenta el tiempo entre salidas ya que el tiempo real necesario para satisfacer la demanda de las zonas afectadas se incrementa. Además, todos los países deberán tomar sus decisiones de manera simultánea lo que nos permite estimar el número real de días para la distribución de ayuda. Sin embargo, se alcanza el tiempo mínimo para el envío de todos las cargas después de resolver el modelo binivel propuesto.

El modelo de la sección 2.5 no se resolvió en este trabajo debido a que dentro del ambiente computacional considerado para esta tesis no pudo ser resuelto a

optimalidad, la computadora quedó sin memoria después de más de 18 horas. Para poder resolverlo hay que pensar en alguna técnica heurística, lo cual se describe en el trabajo futuro.

## Capítulo 5

# Conclusiones

En esta sección se mostrará la descripción del trabajo hecho, además de mostrar algunas conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron luego de la experimentación con el modelo propuesto.

### 5.1 Descripción del trabajo hecho

En este trabajo se propuso un problema matemático de programación binivel para la distribución de la ayuda internacional después de un desastre. Debido a la falta de software comercial capaz de resolver problemas de programación binivel, reformulamos el problema binivel en un problema mixto entero de un solo nivel equivalente. Esta reformulación resolvió un caso real de un terremoto que ocurrió en Chile hace algunos años. Para hacer algunas conclusiones sobre los resultados numéricos obtenidos, se comparó el problema binivel contra otros dos modelos representando situaciones extremas relacionadas con este problema de logística humanitaria.

## 5.2 Conclusiones y recomendaciones

Mencionaremos las conclusiones que obtuvimos de esta investigación:

Diferenciamos claramente las soluciones óptimas bi-nivel de las soluciones óptimas para otros modelos relacionados (*Perspectiva del Líder y Perspectiva del Seguidor*). Como se ve en la Figura 2, los puntos óptimos para los modelos extremos son las soluciones para el modelo bi-objetivo teniendo en cuenta los valores de la función objetivo ponderada; para ser más precisos el punto de perspectiva del líder es el extremo cuando los valores son 1 y 0 para  $F(x, y)$  y  $f(x, y)$  respectivamente. Por otro lado, la *Perspectiva del Seguidor* es el otro extremo cuando los valores son 0 y 1 para las funciones objetivo correspondientes.

De hecho, Calvete y Galé (2010) analizaron las diferencias entre programación bi-nivel y programación bi-objetivo. Llegaron a la conclusión, que aunque algunos investigadores han intentado establecer una relación formal entre ambos problemas, no existe una conclusión determinante sobre esta relación. Por otra parte, varios contraejemplos que refutan la relación entre ellos aparecen en Candler (1998), Clarke y Westerberg (1988), Haurie et al. (1990), y Marcotte y Savard (1991). Estos autores mostraron gráficamente que las soluciones óptimas de un problema de programación bi-nivel no se producen en la frontera Pareto de soluciones eficientes de un problema de programación bi-objetivo, como se muestra en la Figura 2.

Los resultados obtenidos nos muestran la importancia de contar con un organismo central que coordine todo el proceso, incluso sin una perfecta coordinación entre todas las partes involucradas, esta coordinación ayudaría significativamente a hacer las sociedades más sostenibles. Seuring y Muller (2008) establecieron el esfuerzo de coordinación y la complejidad como factores de limitación para una cadena de suministro sostenible. Por lo tanto, el papel central de la agencia sería muy importante durante la etapa de respuesta después de ocurrido un desastre.

En particular, la existencia de una jerarquía en este problema nos permite analizarlo más adecuadamente que con el enfoque dado por la programación multi-objetivo. En este caso, la decisión del país afectado tiene más importancia que las decisiones tomadas en los países de las organizaciones de envío de ayuda. Por lo tanto, en el área de Logística Humanitaria, es de interés este problema bajo este enfoque. Como resultado de esta investigación, se puede concluir que el modelo bi-nivel funciona bien para esta situación, que nos lleva a recomendar la necesidad de contar con un organismo central de coordinación de todas las operaciones relacionadas con la recepción y distribución de la ayuda internacional.

## 5.3 Trabajo Futuro

En esta sección se mencionarán puntos sobre los que se pueden trabajar de este problema en una investigación a futuro.

Para las futuras oportunidades de investigación, el problema descrito aquí puede ser modelado como un problema bi-nivel con múltiples seguidores no independientes, es decir, cada país y organismo que proporcionan ayuda humanitaria tienen sus propios intereses y presupuestos separados, por lo tanto, comparten una restricción asociada a la demanda en cada centro de almacenamiento. Teniendo en cuenta el hecho de que se necesita una reacción racional del seguidor, debe producirse una definición adecuada de la región inducible. En el nivel inferior, un juego de Nash se lleva a cabo, mientras que el problema binivel puede ser visto como un juego Stackelberg. Es necesario introducir varios conceptos básicos para poder resolver de manera correcta el problema.

Por otra parte, podemos analizar el enfoque considerado en Özkir y Basligil (2013) mediante la incorporación de estocasticidad en las demandas de ayuda y condiciones de la carretera debido a la incertidumbre del entorno. Con base en la magnitud del desastre, la demanda de ayuda podría variar, por lo que puede crear diferentes escenarios y aplicar técnicas de optimización robustas o simulación para resolver el problema. Además, se puede considerar la interrupción de las redes de transporte, ya que, cuando se produce un desastre, algunas de las carreteras de transporte pueden cerrar o tener daño reduciendo el buen flujo de transporte. Por último, una interesante extensión de este problema sería considerar el balanceo de la ayuda recibida en los centros de almacenamiento para evitar la saturación de algunos centros de acopio y que haya otros siguen siendo subutilizados.

# Referencias

- Aksen, D., Aras, N., 2012. A Bi-level Fixed Charge Location Model for Facilities under Imminent Attack. *Comput. Oper. Res.* 39, 1364-1381.
- Altay, N., Green, W.G., 2006. Interfaces with other Disciplines OR/MS Research in Disaster Operations Management. *Eur. J. Oper. Res.* 175, 475-493.
- Arroyo, J.M., Galiana, F.D., 2005. On the Solution of the Bi-level Programming Formulation of the Terrorist Threat Problem. *IEEE T. Power Syst.* 20(2), 789-797.
- Barbarosoglu, G., Arda, Y., 2004. A two-stage Stochastic Programming Framework for transportation Planning in Disaster Response. *J. Oper. Res. Soc.* 55, 43-53.
- Barbarosoglu, G., Özdamar, L., Cevik, A., 2002. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. *Eur. J. Oper. Res.* 140(1), 118-33.
- Bard, J.F., 1998. *Practical Bi-level Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Bracken, J., McGill, J.T., 1973. Mathematical Programs with Optimization Problems in the Constraints. *Oper. Res.* 21 (1), 37-44.
- Caunhye, A.M., Nie, X., Pokharel, S., 2012. Optimization Models in Emergency Logistics: A Literature Review. *Socio. Econ. Plan. Sci.* 46, 4-13.
- Calvete, H.I., Galé, C., 2010. A Multiobjective Bi-level Program for Production-Distribution Planning in a Supply Chain, in: Ehrgot, M., et. al. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Making for Sustainable Energy and Transportation Systems*. *Lect. Notes Econ. Math.* 634. Springer-Verlag, Berlin, pp. 155-165.
- Candler, W., 1988. A linear bi-level programming algorithm: A comment. *Comput. Oper. Res.* 15, 297-298.
- Clarke, P., Westerberg, A. 1988. A note on the optimality conditions for the bi-level programming problem. *Nav. Res. Logis.* 35, 413-418.
- Colson, B., Marcotte, P., Savard, G., 2007. An overview of bi-level optimization. *Ann. Oper. Res.* 153, 235-256.
- Cruz, J.M., 2013. Modeling the relationship of globalized supply chains and corporate social responsibility. *J. Clean. Prod.* 56, 73-85.
- Dempe, S., 2002. *Foundations of Bi-level Programming*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Dües, C.M., Tan, K.H., Lim, M., 2013. Green as the new Lean: how to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain. *J. Clean. Prod.* 40, 93-100.
- Duman. E., 2007. Decision making by simulation in a parcel transportation company. *J. Franklin I.* 344, 672-683.
- Fiedrich, F., Gehbauer, F., Rickers, U., 2000. Optimized Resource Allocation for Emergency Response after Earthquake Disasters. *Safety Sci.* 35, 41-57.

- Feng, C.M., Wen, C.C., 2005. A Bi-level Programming Model for Allocating Private and Emergency Vehicle Flows in Seismic Disaster Areas. In: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 5, 1408-1423.
- Gramani, M.C.N., Franca, P.M., Arenales, M.N., 2011. A linear optimization approach to the combined production planning model, *J. Franklin I.* 348, 1523-1536.
- Gupta, A.K., Suresh, I.V., Misra, J., Yunus, M., 2002. Environmental risk mapping approach: risk minimization toll for development of industrial growth center in developing countries, *J. Clean. Prod.* 10, 271-281.
- Haurie, A., Savard, G., White, D., 1990. A note on: an efficient point algorithm for a linear two-stage optimization problem. *Oper. Res.* 38, 553-555.
- Holguin-Veras, J., Pérez, N., Jaller, M., Van Wassenhove, L.N., Aros-Vera, F., 2013. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models. *J. Oper. Manage.* 31, 262-280.
- Ji, G., Zhu, C., 2012. A Study on Emergency Supply Chain and Risk Based on Urgent Relief Service in Disasters. *Syst. Eng. Procedia.* 5, 313-325.
- Kongsomsaksakul, S., Yang, Ch., 2005. Shelter Location-Allocation Model for Flood Evacuation Planning. *J. Eastern Asia Soc. Transport. Stud.* 6, 4237-4252.
- Li, A.C.Y., Nozick, L., Xu, N., Davidson, R., 2012. Shelter location and transportation planning under hurricane conditions. *Transport. Res. E-Log.* 48, 715-729.
- Liberatore, F., Ortuño, M.T., Tirado, G., Vitoriano, B., Scaparra, M.P., 2014. A Hierarchical Compromise Model for the Joint Optimization of Recovery Operations and Distribution-of Emergency Goods in Humanitarian Logistics. *Comput. Oper. Res.* 42, 3-13.
- Losada, Ch., Scaparra, M.P, O'Hanley, J.R., 2012. Optimizing System Resilience: A Facility Protection Model with Recovery Time. *Eur. J. Oper. Res.* 217, 519-530.
- Marcotte, P., Savard, G. 1991. A note on the Pareto optimality of solutions to the linear bi-level programming problem. *Comput. Oper. Res.* 18, 355-359.
- Mete, H.O., Zabinsky, Z.B., 2010. Stochastic Optimization of Medical Supply Location and Distribution in Disaster Management. *Int. J. Prod. Econ.* 126, 76-84.
- Özdamar, L., Demir, O., 2012. A Hierarchical Clustering and Routing Procedure for large Scale Disaster Relief Logistics Planning. *Transport. Res. E-Log.* 48, 591-602.
- Özdamar, L., Ekinçi, E., Küçükayazıcı, B., 2004. Emergency Logistics Planning in Natural Disasters. *Ann. Oper. Res.* 129, 217-245.
- Özkir, V., Basligil, H., 2013. Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *J. Clean. Prod.* 41, 114-125.
- Rath, S., Gutjahr, W.J., 2014. A Math-Heuristic for the Warehouse Location-Routing Problem in Disaster Relief. *Comput. Oper. Res.* 42, 25-39.
- Rathi, A.K., Church, R.L., Solanski, R.S., 1993. Allocating Resources to Support a Multicommodity Flow with Time Windows. *Logis. Transport. Rev.* 28, 167-188.
- Rawls, C.G., Turnquist, M.A., 2010. Pre-positioning of Emergency Supplies for

Disaster Response. *Transport. Res. B-Meth.* 44, 521-534.

- Sanayei, A., Mousavi, S.F., Abdi, M.R., Mohaghar, A., 2008. An integrated group decision-making process for supplier selection and order allocation using multi-attribute utility theory and linear programming. *J. Franklin I.* 345, 731-747.
- Schliephake, K., Stevens, G., Clay, S., 2009. Making resources work more efficiently – the importance of supply chains partnerships. *J. Clean. Prod.* 17, 1257-1263.
- Seuring, S., Müller, M., 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *J. Clean. Prod.* 16, 1699-1710.
- Sheu, J.B., 2007. An Emergency Logistics Distribution Approach for Quick Response to Urgent Relief Demand in Disasters. *Transport. Res. E-Log.* 43, 687-709.
- Sheu, J.B., Chen, Y.H., 2005. A Novel Model for Quick Response to Disaster Relief Distribution. In: *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.* 5, 2454-2462.
- Vicente L., Calamai H., 1994. Bi-level and Multilevel Programming: A Bibliography Review. *J. Global Optim.* 5(3), 291-306.
- Vitoriano, B., Ortuño, M.T., Tirado, G., Montero, J., 2011. A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution. *J. Global Optim.* 51, 189-208.
- Wamsler, C., brink, E., Rivera, C., 2013. Planning for climate change in urban areas: from theory to practice. *J. Clean. Prod.* 50, 68-81.
- Wang, Q., Rong, L., 2007. Agile Knowledge Supply Chain for Emergency Decision-Making Support. In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Computational Science, Part IV*, 178-185.
- Wex, F., Schryen, G., Neumann, D., 2011. Intelligent Decision Support for Centralized Coordination during Emergency Response. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International ISCRAM Conference.*



# Apéndice

En esta sección aparecen las tablas de datos que se utilizaron en el caso de estudio del terremoto que ocurrió en Chile en el 2010, además se muestran las tablas de resultados que se obtuvieron con la experimentación computacional.

## Tablas de datos del Capítulo 3.

**Tabla 1.** Origen de los envíos por parte de los países.

	<b>PAISES</b>	<b>Modo Aéreo</b>	<b>Modo Marítimo</b>	<b>Modo Terrestre</b>
1	Alemania	Aeropuerto Madrid	Puerto Hamburgo	No Aplica
2	Argentina	Aeropuerto EZEIZA Buenos Aires	Puerto Buenos Aires	Buenos Aires
3	Bolivia	Aeropuerto La Paz	No Aplica	La Paz
4	Brasil	Aeropuerto Sao Paulo	Puerto Santos	No Aplica
5	Colombia	Aeropuerto Bogotá	Puerto Buenaventura	No Aplica
6	Cuba	Aeropuerto Havana	Puerto en Jamaica	No Aplica
7	España	Aeropuerto Barcelona	Puerto de Barcelona	No Aplica
8	Estados Unidos	Aeropuerto Nueva York	Puerto de Nueva York	No Aplica
9	México	Aeropuerto Ciudad de México	Puerto de Manzanillo	No Aplica
10	Perú	Aeropuerto Lima	Puerto de Callao	Lima
11	Ecuador	Aeropuerto Guayaquil	Puerto de Guayaquil	No Aplica
12	Venezuela	Aeropuerto Caracas	Puerto Cartagena	No Aplica

**Tabla 2:** Ubicación Centros de Acopio y Puntos de Demanda.

<b>Región</b>	<b>Provincia</b>	<b>Centro de Acopio</b>	<b>Capacidad Centro Acopio</b>	<b>Puntos de Demanda (Comunas)</b>	<b>Población Afectada</b>	<b>Demanda Kit 1</b>	<b>Demanda Kit 2</b>
Región Metropolitana	Santiago	Ñuñoa	11.804	Zona Metropolitana de Santiago	28.000	280.000	112.000
		San Joaquín	11.804	Juan Fernández	401	4.005	1.602
Región de Valparaíso	Provincia Valparaíso	Valparaíso	39.344	Valparaíso	22.079	220.786	88.314
				Viña del Mar	22.954	229.545	91.818
				Concón	2.582	25.818	10.327
	Provincia de San Antonio	San Antonio	10.109	San Antonio	10.524	105.236	42.095
				Lolleo	1.620	16.204	6.481
Región L. B. O'Higgins	Provincia de Cachapoal	Rancagua	96.161	Rancagua	49.636	496.362	198.545
				Machali	33.457	334.569	133.828
				San Vicente	33.457	334.569	133.828
	Provincia de Colchagua	San Fernando	32.502	Chépica	19.657	196.566	78.626
				San Fernando	19.657	196.566	78.626
	Provincia de Cardenal Caro	Pichilemu	6.885	Pichilemu	2.744	27.440	10.976
Litueche				2.744	27.440	10.976	
Paredones				2.744	27.440	10.976	
Región del Maule	Provincia de Talca	Talca	167.001	Constitución	42.554	425.540	170.216
				Pelarco	14.716	147.155	58.862
				Talca	145.231	1.452.305	580.922
	Provincia de Cauquenes	Cauquenes	28.070	Cauquenes	26.436	264.355	105.742
				Pelluhue	7.500	75.000	30.000

	Provincia de Curicó	Curicó	100.674	Curicó	70.177	701.765	280.706
				Molina	25.925	259.250	103.700
				Teno	25.925	259.250	103.700
	Provincia de Linares	Linares	105.575	Linares	58.686	586.855	234.742
				Longavi	34.644	346.435	138.574
				Parral	34.644	346.435	138.574
Región Del Bío-Bío	Provincia de Concepción	Concepción	550.224	Concepción	282.465	2.824.649	1.129.859
				Tomé	64.759	647.591	259.037
				Coronel	133.881	1.338.807	535.523
				Talcahuano	186.359	1.863.593	745.437
	Provincia de Arauco	Lebu	68.038	Lebu	31.500	315.000	126.000
				Arauco	50.929	509.285	203.714
	Provincia BioBio	Los Ángeles	145.701	Los Ángeles	118.500	1.185.000	474.000
				Yumbel	26.688	266.880	106.752
				Mulchen	31.470	314.695	125.878
	Provincia Ñuble	Chillán	182.085	Chillan	110.401	1.104.010	441.604
				Yungay	55.201	552.005	220.802
				San Nicolás	55.201	552.005	220.802
Región de la Araucanía	Provincia Cautín	Temuco	70.356	Temuco	41.785	417.850	167.140
				Villarica	21.728	217.282	86.913
				Padre las Casas	21.728	217.282	86.913
	Provincia Malleco	Provincia Malleco	23.769	Angol	14.507	145.070	58.028

				Victoria	7.253	72.535	29.014
				Collipulli	6.957	69.575	27.830

**Tabla 3:** Ubicación Centros de Acopio y Puntos de Demanda

DEMANDA PRODUCTOS		LÍQUIDOS (7 unidades= 10 litros)	ALIMENTOS NO PERECIBLES (7 unidades= 1,5 kgs)	PRODUCTOS PERSONALES (4 unidades= 1 kg)	MEDICAMENTOS (4 unidades= 0,20 kg)
KIT-1	20.000.004	140.000.028	140.000.028		
KIT-2	8.000.002			32.000.006	32.000.006
<b>Demanda unitaria</b>		1.400.000.280 litros	210.000.042 kilogramos	32.000.006 kilogramos	6.400.001 kilogramos
<b>Pallet</b>		1.400.000	210.000	32.000	6.400

**Tabla 4:** Disponibilidad de productos por país en pallets.

<b>PAISES</b>	<b>LÍQUIDOS</b>	<b>ALIMENTOS NO PERECIBLES</b>	<b>PRODUCTOS PERSONALES</b>	<b>MEDICA- MENTOS</b>	<b>Economía</b>
<b>Alemania</b>	211.000	32.000	5.000	1.060	Muy Alta
<b>Argentina</b>	106.000	16.250	2.600	580	Media
<b>Bolivia</b>	71.000	11.000	1.800	420	Baja
<b>Brasil</b>	141.000	21.500	3.400	740	Alta
<b>Colombia</b>	106.000	16.250	2.600	580	Media
<b>Cuba</b>	71.000	11.000	1.800	420	Baja
<b>España</b>	106.000	16.250	2.600	580	Media
<b>Estados Unidos</b>	211.000	32.000	5.000	1.060	Muy Alta
<b>México</b>	141.000	21.500	3.400	740	Alta
<b>Perú</b>	106.000	16.250	2.600	580	Media
<b>Ecuador</b>	71.000	11.000	1.800	420	Baja
<b>Venezuela</b>	71.000	11.000	1.800	420	Baja
<b>Total</b>	1.412.000	216.000	34.400	7.600	

**Tabla 5: Costo Consolidado País-Centro de Acopio x Modo Transporte Aéreo x Pallet.**

	Alemania	Argentina	Bolivia	Brasil	Colombia	Cuba	España	E. Unidos	México	Perú	Ecuador	Venezuela
Ñuñoa-ÑSCL	6307,06	4166,17	4222,6 7	4376,49	4765,74	5261,72	6275,67	5704,34	5456,35	4348,24	4599,37	4919,56
San Joaquín-JSCL	6306,72	4165,83	4222,3 4	4376,15	4765,41	5261,39	6275,33	5704,01	5456,02	4347,90	4599,03	4919,23
Valparaíso-VAP	6315,39	4174,50	4231,0 0	4384,82	4774,07	5270,06	6284,00	5712,68	5464,68	4356,57	4607,70	4927,89
San Antonio-SAI	6314,72	4173,83	4230,34	4384,15	4773,41	5269,39	6283,33	5712,01	5464,02	4355,90	4607,03	4927,23
Rancagua-RAN	6314,39	4173,50	4230,00	4383,82	4773,07	5269,06	6283,00	5711,68	5463,68	4355,57	4606,70	4926,89
San Fernando-SF	6320,39	4179,50	4236,00	4389,82	4779,07	5275,06	6289,00	5717,68	5469,68	4361,57	4612,70	4932,89
Pichilemu-PICH	6326,28	4185,39	4241,89	4395,71	4784,96	5280,95	6294,89	5723,57	5475,57	4367,46	4618,59	4938,78
Talca-TAL	6333,28	4192,39	4248,89	4402,71	4791,96	5287,95	6301,89	5730,57	5482,57	4374,46	4625,59	4945,78
Cauquenes-CAU	6344,39	4203,50	4260,00	4413,82	4803,07	5299,06	6313,00	5741,68	5493,68	4385,57	4636,70	4956,89
Curicó-CUR	6326,50	4185,61	4242,11	4395,93	4785,19	5281,17	6295,11	5723,79	5475,80	4367,68	4618,81	4939,00
Linares-LIN	6338,84	4197,94	4254,45	4408,27	4797,52	5293,50	6307,44	5736,12	5488,13	4380,01	4631,14	4951,34
Concepción-CON	6360,39	4219,50	4276,00	4429,82	4819,07	5315,06	6329,00	5757,68	5509,68	4401,57	4652,70	4972,89
Lebu-LEB	6375,17	4234,28	4290,78	4444,60	4833,85	5329,84	6343,78	5772,45	5524,46	4416,35	4667,48	4987,67
Los Angeles-LA	6361,95	4221,05	4277,56	4431,38	4820,63	5316,61	6330,56	5759,23	5511,24	4403,12	4654,26	4974,45
Chillán-CHL	6349,84	4208,94	4265,45	4419,27	4808,52	5304,50	6318,44	5747,12	5499,13	4391,01	4642,14	4962,34
Temuco-TEM	6380,28	4239,39	4295,89	4449,71	4838,96	5334,95	6348,89	5777,57	5529,57	4421,46	4672,59	4992,78
Malleco-MALL	6373,95	4233,05	4289,56	4443,38	4832,63	5328,61	6342,56	5771,23	5523,24	4415,12	4666,26	4986,45

**Tabla 6: Costo Consolidado País-Centro de Acopio x Modo Transporte Marítimo x Pallet.**

	Alemania	Argentina	Bolivia	Brasil	Colombia	Cuba	España	E. Unidos	México	Perú	Ecuador	Venezuela
Ñuñoa-ÑSCL	250,41	157,49	NA	188,46	95,54	188,46	227,18	188,46	118,77	49,08	87,80	188,46
San Joaquin-JSCL	249,85	156,93	NA	187,91	94,99	187,91	226,62	187,91	118,22	48,53	87,24	187,91
Valparaiso-VAP	244,63	151,71	NA	182,68	89,77	182,68	221,40	182,68	113,00	43,31	82,02	182,68
San Antonio- SAI	253,36	160,44	NA	191,42	98,50	191,42	230,13	191,42	121,73	52,04	90,76	191,42
Rancagua-RAN	265,19	172,27	NA	203,24	110,32	203,24	241,96	203,24	133,55	63,86	102,58	203,24
San Fernando-SF	275,96	183,04	NA	214,02	121,10	214,02	252,73	214,02	144,33	74,64	113,36	214,02
Pichilemu-PICH	280,19	187,27	NA	218,24	125,32	218,24	256,96	218,24	148,55	78,86	117,58	218,24
Talca-TAL	300,74	207,82	NA	238,80	145,88	238,80	277,51	238,80	169,11	99,42	138,13	238,80
Cauquenes- CAU	322,85	229,93	NA	260,91	167,99	260,91	299,62	260,91	191,22	121,53	160,24	260,91
Curicó- CUR	287,07	194,16	NA	225,13	132,21	225,13	263,84	225,13	155,44	85,75	124,47	225,13
Linares- LIN	311,85	218,93	NA	249,91	156,99	249,91	288,62	249,91	180,22	110,53	149,24	249,91
Concepción-CON	354,96	262,04	NA	293,02	200,10	293,02	331,73	293,02	223,33	153,64	192,36	293,02
Lebu- LEB	384,30	291,38	NA	322,35	229,43	322,35	361,07	322,35	252,66	182,97	221,69	322,35
Los Angeles-LA	358,07	265,16	NA	296,13	203,21	296,13	334,84	296,13	226,44	156,75	195,47	296,13
Chillan-CHL	333,74	240,82	NA	271,80	178,88	271,80	310,51	271,80	202,11	132,42	171,13	271,80
Temuco-TEM	394,19	301,27	NA	332,24	239,32	332,24	370,96	332,24	262,55	192,86	231,58	332,24
Malleco-MALL	381,63	288,71	NA	319,68	226,77	319,68	358,40	319,68	250,00	180,31	219,02	319,68

**Tabla 7: Costo Consolidado País-Centro de Acopio x Modo Transporte Terrestre x Pallet.**

	Argentina	Peru	Bolivia
Ñuñoa-ÑSCL	172,44	381,89	333,44
San Joaquin-JSCL	172,44	381,78	333,33
Valparaiso-VAP	177,56	375,44	338,44
San Antonio- SAI	183,89	382,89	344,89
Rancagua-RAN	181,00	390,44	342,00
San Fernando-SF	186,89	396,33	347,89
Pichilemu-PICH	194,56	398,00	355,56
Talca-TAL	199,89	409,22	360,78
Cauquenes- CAU	210,89	420,33	371,89
Curicó- CUR	193,00	402,44	354,00
Linares- LIN	205,33	414,78	366,33
Concepción-CON	202,44	436,33	387,89
Lebu- LEB	200,78	451,11	418,89
Los Angeles-LA	190,67	437,89	408,78
Chillan-CHL	202,78	425,78	377,33
Temuco-TEM	180,11	456,22	398,22
Malleco-MALL	183,78	449,89	401,89



**Tabla 8:** Tiempo Recorrido País-Centro de Acopio x Modo Transporte Aéreo x Pallet.

	Alemania	Argentina	Bolivia	Brasil	Colombia	Cuba	España	Estados Unidos	México	Perú	Ecuador	Venezuela
Ñuñoa-ÑSCL	2.052	1.370	1.388	1.437	1.561	1.719	2.042	1.860	1.781	1.428	1.508	1.610
San Joaquín-JSCL	2.053	1.371	1.389	1.438	1.562	1.720	2.043	1.861	1.782	1.429	1.509	1.611
Valparaíso-VAP	2.133	1.451	1.469	1.518	1.642	1.800	2.123	1.941	1.862	1.509	1.589	1.691
San Antonio- SAI	2.125	1.443	1.461	1.510	1.634	1.792	2.115	1.933	1.854	1.501	1.581	1.683
Rancagua-RAN	2.126	1.444	1.462	1.511	1.635	1.793	2.116	1.934	1.855	1.502	1.582	1.684
San Fernando-SF	2.183	1.501	1.519	1.568	1.692	1.850	2.173	1.991	1.912	1.559	1.639	1.741
Pichilemu-PICh	2.254	1.572	1.590	1.639	1.763	1.921	2.244	2.062	1.983	1.630	1.710	1.812
Talca-TAL	2.312	1.630	1.648	1.697	1.821	1.979	2.302	2.120	2.041	1.688	1.768	1.870
Cauquenes- CAU	2.427	1.745	1.763	1.812	1.936	2.094	2.417	2.235	2.156	1.803	1.883	1.985
Curicó- CUR	2.244	1.562	1.580	1.629	1.753	1.911	2.234	2.052	1.973	1.620	1.700	1.802
Linares- LIN	2.308	1.626	1.644	1.693	1.817	1.975	2.298	2.116	2.037	1.684	1.764	1.866
Concepción-CON	2.585	1.903	1.921	1.970	2.094	2.252	2.575	2.393	2.314	1.961	2.041	2.143
Lebu- LEB	2.745	2.063	2.081	2.130	2.254	2.412	2.735	2.553	2.474	2.121	2.201	2.303
Los Angeles-LA	2.596	1.914	1.932	1.981	2.105	2.263	2.586	2.404	2.325	1.972	2.052	2.154
Chillan-CHL	2.475	1.793	1.811	1.860	1.984	2.142	2.465	2.283	2.204	1.851	1.931	2.033
Temuco-TEM	2.777	2.095	2.113	2.162	2.286	2.444	2.767	2.585	2.506	2.153	2.233	2.335
Malleco-MALL	2.713	2.031	2.049	2.098	2.222	2.380	2.703	2.521	2.442	2.089	2.169	2.271

**Tabla 9: Tiempo Recorrido País-Centro de Acopio x Modo Transporte Marítimo x Pallet.**

	Alemania	Argentina	Bolivia	Brasil	Colombia	Cuba	España	Estados Unidos	México	Perú	Ecuador	Venezuela
Ñuñoa-ÑSCL	250,41	157,49	NA	188,46	95,54	188,46	227,18	188,46	118,77	49,08	87,80	188,46
San Joaquin-JSCL	249,85	156,93	NA	187,91	94,99	187,91	226,62	187,91	118,22	48,53	87,24	187,91
Valparaiso-VAP	244,63	151,71	NA	182,68	89,77	182,68	221,40	182,68	113,00	43,31	82,02	182,68
San Antonio- SAI	253,36	160,44	NA	191,42	98,50	191,42	230,13	191,42	121,73	52,04	90,76	191,42
Rancagua-RAN	265,19	172,27	NA	203,24	110,32	203,24	241,96	203,24	133,55	63,86	102,58	203,24
San Fernando-SF	275,96	183,04	NA	214,02	121,10	214,02	252,73	214,02	144,33	74,64	113,36	214,02
Pichilemu-PICH	280,19	187,27	NA	218,24	125,32	218,24	256,96	218,24	148,55	78,86	117,58	218,24
Talca-TAL	300,74	207,82	NA	238,80	145,88	238,80	277,51	238,80	169,11	99,42	138,13	238,80
Cauquenes- CAU	322,85	229,93	NA	260,91	167,99	260,91	299,62	260,91	191,22	121,53	160,24	260,91
Curicó- CUR	287,07	194,16	NA	225,13	132,21	225,13	263,84	225,13	155,44	85,75	124,47	225,13
Linares- LIN	311,85	218,93	NA	249,91	156,99	249,91	288,62	249,91	180,22	110,53	149,24	249,91
Concepción-CON	354,96	262,04	NA	293,02	200,10	293,02	331,73	293,02	223,33	153,64	192,36	293,02
Lebu- LEB	384,30	291,38	NA	322,35	229,43	322,35	361,07	322,35	252,66	182,97	221,69	322,35
Los Angeles-LA	358,07	265,16	NA	296,13	203,21	296,13	334,84	296,13	226,44	156,75	195,47	296,13
Chillan-CHL	333,74	240,82	NA	271,80	178,88	271,80	310,51	271,80	202,11	132,42	171,13	271,80
Temuco-TEM	394,19	301,27	NA	332,24	239,32	332,24	370,96	332,24	262,55	192,86	231,58	332,24
Malleco-MALL	381,63	288,71	NA	319,68	226,77	319,68	358,40	319,68	250,00	180,31	219,02	319,68

**Tabla 10:** Tiempo Recorrido País-Centro de Acopio x Modo Transporte Terrestre x Pallet.

	Argentina	Peru	Bolivia
Ñuñoa-ÑSCL	3.917	6.241	5.100
San Joaquin-JSCL	3.917	6.240	5.099
Valparaiso-VAP	3.968	6.180	5.100
San Antonio- SAI	4.023	6.240	5.160
Rancagua-RAN	3.997	6.300	5.140
San Fernando-SF	4.055	6.360	5.220
Pichilemu-PICH	4.143	6.420	5.280
Talca-TAL	4.184	6.480	5.340
Cauquenes- CAU	4.298	6.600	5.460
Curicó- CUR	4.115	6.420	5.260
Linares- LIN	4.237	2.880	5.400
Concepción-CON	4.273	6.780	5.580
Lebu- LEB	4.249	6.900	5.700
Los Angeles-LA	4.149	6.780	5.595
Chillan-CHL	4.271	6.660	5.530
Temuco-TEM	4.041	6.960	5.470
Malleco-MALL	4.079	6.900	5.540

**Tabla 11:** Tiempo y Distancia Recorrido Centro de Acopio-Comuna x Pallet.

C. Acopio	Ñuñoa-ÑSCL	Tiempo	Costo/pallet
Comuna	Santiago	15,00	1,00
Comuna	Juan Fernández	780,00	2448,53
C.Acopio	<b>San Joaquín-JSCL</b>		
Comuna	Santiago	25,00	1,78
Comuna	Juan Fernández	780,00	2448,53
C.Acopio	<b>Valparaíso-VAP</b>		
Comuna	Valparaíso	10,00	0,56
Comuna	Viña del Mar	14,00	0,98
Comuna	Concón	35,00	2,50
C.Acopio	<b>San Antonio- SAI</b>		
Comuna	San Antonio	6,00	0,33
Comuna	Llolleo	7,00	0,44
C.Acopio	<b>Rancagua-RAN</b>		
Comuna	Rancagua	10,00	0,56
Comuna	Machali	17,00	1,09
Comuna	San Vicente	81,00	7,63
C.Acopio	<b>San Fernando-SF</b>		
Comuna	Chépica	45,00	4,17
Comuna	San Fernando	8,00	0,44
C.Acopio	<b>Pichilemu-PICH</b>		
Comuna	Pichilemu	10,00	0,56
Comuna	Litueche	69,00	6,63
Comuna	Paredones	50,00	4,42
C.Acopio	<b>Talca-TAL</b>		
Comuna	Constitución	116,00	10,79
Comuna	Pelarco	33,00	2,80

Comuna	Talca	10,00	0,56
C. Acopio	<b>Cauquenes- CAU</b>		
Comuna	Cauquenes	8,00	0,44
Comuna	Pelluhue	61,00	5,63
C. Acopio	<b>Curicó- CUR</b>		
Comuna	Curicó	10,00	0,56
Comuna	Molina	27,00	2,17
Comuna	Teno	27,00	2,04
C. Acopio	<b>Linares- LIN</b>		
Comuna	Linares	8,00	0,44
Comuna	Longavi	28,00	2,13
Comuna	Parral	50,00	4,78
C. Acopio	<b>Concepción-CON</b>		
Comuna	Concepción	10,00	0,56
Comuna	Tomé	44,00	3,29
Comuna	Coronel	43,00	3,41
Comuna	Talcahuano	21,00	1,48
C. Acopio	<b>Lebu- LEB</b>		
Comuna	Lebu	8,00	0,44
Comuna	Arauco	71,00	6,78
C. Acopio	<b>Los Angeles-LA</b>		
Comuna	Los Ángeles	8,00	0,44
Comuna	Yumbel	65,00	5,93
Comuna	Mulchen	39,00	3,49
C. Acopio	<b>Chillan-CHL</b>		
Comuna	Chillan	10,00	0,56
Comuna	Yungay	81,00	7,47
Comuna	San Nicolás	34,00	2,83

C. Acopio	<b>Temuco-TEM</b>		
Comuna	Temuco	10,00	0,56
Comuna	Villarica	95,00	9,01
Comuna	Padre las Casas	11,00	0,57
C. Acopio	<b>Malleco-MALL</b>		
Comuna	Angol	74,00	6,41
Comuna	Victoria	43,00	4,21
Comuna	Collipulli	48,00	4,73

## Tablas de resultados del Capítulo 4.

### Distribución de la ayuda por modo aéreo de los países a los centros de acopio.

Líquidos-Aéreo		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Alemania	Concepción	21099
	Chillán	1
Argentina	Cauquenes	23754
Bolivia	Los Ángeles	60798
	Chillán	10202
Brasil	Linares	10337
	Los Ángeles	2085
	Chillán	128578
Cuba	Lebu	55221
	Chillán	15779
España	Concepción	45224
	Los Ángeles	60776
Estados Unidos	Concepción	211000
Venezuela	Linares	71000

Alimentos no perecibles-Aéreo		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Alemania	Concepción	17517
	Los Ángeles	2298
	Chillán	12185
Argentina	Cauquenes	3562
Bolivia	Linares	10999
	Concepción	1
Brasil	Talca	1573
	Linares	2436
	Concepción	9563
	Lebu	7928
Cuba	Concepción	11000
España	Los Ángeles	16250
Estados Unidos	Concepción	32000
Venezuela	Lebu	1
	Chillán	10999

Productos Personales-Aéreo		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Alemania	Concepción	3267
	Chillán	1733
Argentina	Cauquenes	542
Bolivia	Talca	1237
	Linares	246
	Concepción	317
Brasil	Concepción	3400
Cuba	Concepción	1
	Chillán	1799
España	Concepción	1519
	Lebu	1081
Estados Unidos	Concepción	2174
	Los Ángeles	2826
Venezuela	Linares	1800

Medicamentos-Aéreo		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Alemania	Concepción	1058
	Los Ángeles	2
Argentina	Cauquenes	108
Bolivia	Los Ángeles	119
	Chillán	301
Brasil	Talca	647
	Curicó	91
	Concepción	2
Cuba	Concepción	15
	Los Ángeles	1
	Chillán	404
España	Lebu	261
	Temuco	271
	Provincia Malleco	48
Estados Unidos	Concepción	1059
	Lebu	1
Venezuela	Linares	407
	Los Ángeles	13



**Distribución de la ayuda por modo marítimo de los países a los centros de acopio.**

Líquidos-Marítimo		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Colombia	Talca	106000
México	San Joaquín	8077
	San Antonio	8500
	Rancagua	12981
	Pichilemu	5760
	Curicó	85417
	Linares	8242
Perú	Ñuñoa	9405
	Valparaíso	33329
	San Fernando	27518
	Talca	35748
Ecuador	Ñuñoa	2398
	Rancagua	68602

Alimentos no perecibles -Marítimo		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Colombia	San Joaquín	2982
	Valparaíso	4999
	Curicó	8269
México	Rancagua	10939
	Curicó	4542
Perú	San Antonio	1274
	San Fernando	4126
	Pichilemu	864
	Talca	9985
	Curicó	1
Ecuador	Rancagua	1296
	Talca	9704

Medicamentos-Marítimo		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Colombia	Rancagua	96
Perú	Valparaíso	151
	San Antonio	38
	Rancagua	267
	San Fernando	124
Ecuador	San Joaquín	90
	Rancagua	9
	Pichilemu	24
	Curicó	297

Productos Personales- Marítimo		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Colombia	Rancagua	1864
	San Fernando	628
	Curicó	108
México	San Antonio	193
	Pichilemu	129
	Talca	658
Perú	San Joaquín	454
	Valparaíso	761
	Talca	1343
	Curicó	42
Ecuador	Curicó	1800

**Distribución de la ayuda por modo terrestre de los países a los centros de acopio.**

Líquidos-Terrestre		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Argentina	Lebu	2478
	Temuco	59667
	Provincia Mallerco	20101

Alimentos no perecibles -Terrestre		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Argentina	Lebu	725
	Temuco	8949
	Provincia Mallerco	3014

Productos Personales- Terrestre		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Argentina	Lebu	237
	Temuco	1362
	Provincia Mallerco	459

Medicamentos-Terrestre		
País	Centro de Acopio	Cantidad
Argentina	Los Ángeles	429
	Provincia Mallerco	43

**Distribución de la ayuda por modo aéreo de los centros de acopio a las zonas afectadas.**

Líquidos-Aéreo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad

Alimentos no perecibles-Aéreo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad

Productos Personales-Aéreo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad

Medicamentos-Aéreo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad

**Distribución de la ayuda por modo marítimo de los centros de acopio a las zonas afectadas.**

Líquidos-Marítimo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad

Alimentos no perecibles-Marítimo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad

Medicamentos-Marítimo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad

Productos Personales-Marítimo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad

**Distribución de la ayuda por modo terrestre de los centros de acopio a las zonas afectadas.**

Líquidos-Terrestre		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad
Ñuñao	Zona Metropolitana de Santiago	11803
San Joaquín	Zona Metropolitana de Santiago	7797
	Juan Fernández	280
Valparaíso	Valparaíso	15454
	Viña del Mar	16068
	Concón	1807
San Antonio	San Antonio	7366
	Lolleo	1134
Rancagua	Rancagua	34745
	Machalli	23419
	San Vicente	23419
San Fernando	Chépica	13759
	San Fernando	13759
Pichilemu	Pichilemu	1920
	Litueche	1920
	Paredones	1920
Talca	Cauquenes	29787
	Pelluhue	10300
	Curicó	101661
Cauquenes	Cauquenes	18504
	Pelluhue	5250
Curicó	Curicó	49123
	Molina	18147
	Teno	18147

Linares	Linares	41079
	Longavi	24250
	Parral	24250
Concepción	Concepción	197725
	Tomé	45331
	Coronel	93716
	Talcahuano	130451
Lebu	Lebu	22050
	Arauco	35649
Los Ángeles	Los Ángeles	82950
	Yumbel	18681
	Mulchen	22028
Chillán	Chillan	77280
	Yungay	38640
	San Nicolás	38640
Temuco	Temuco	29249
	Villarica	15209
	Padre las Casas	15209
Provincia		
Mallerco	Angol	10154
	Victoria	5077
	Collipulli	4870

Alimentos no perecibles-Terrestre		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad
San Joaquín	Zona Metropolitana de Santiago	2940
	Juan Fernández	42
Valparaíso	Valparaíso	2318
	Viña del Mar	2410
	Concón	271
San Antonio	San Antonio	1104
	Llole	170
Rancagua	Rancagua	5211
	Machali	3512
	San Vicente	3512
San Fernando	Chépica	2063
	San Fernando	2063
Pichilemu	Pichilemu	288
	Litueche	288
	Paredones	288
Talca	Constitución	4468
	Pelarco	1545
	Talca	15249
Cauquenes	Cauquenes	2775
	Pelluhue	787
Curicó	Curicó	7368
	Molina	2722
	Teno	2722

Linares	Linares	6161
	Longavi	3637
	Parral	3637
Concepción	Concepción	29658
	Tomé	6799
	Coronel	14057
	Talcahuano	19567
Lebu	Lebu	3307
	Aracuco	5347
Los Ángeles	Los Ángeles	12442
	Yumbel	2802
	Mulchen	3304

Chillán	Chillán	11592
	Yungay	5796
	San Nicolás	5796
Temuco	Temuco	4387
	Villarica	2281
	Padre las Casas	2281
Provincia Malleco	Angol	1523
	Victoria	761
	Collipulli	730

Productos Personales-Terrestre		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad
San Joaquín	Zona Metropolitana de Santiago	448
	Juan Fernández	6
Valparaíso	Valparaíso	353
	Viña del Mar	367
	Concón	41
San Antonio	San Antonio	168
	Llolleo	25
Rancagua	Rancagua	794
	Machalli	535
	San Vicente	535
San Fernando	Chépica	314
	San Fernando	314
Pichilemu	Pichilemu	43
	Litueche	43
	Paredones	43
Talca	Constitución	680
	Pelarco	235
	Talca	2323
Cauquenes	Cauquenes	422
	Pelluhue	120
Curicó	Curicó	1122
	Molina	414
	Teno	414

Líquidos-Terrestre		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad
Ñuñao	Zona Metropolitana de Santiago	11803
San Joaquín	Zona Metropolitana de Santiago	7797
	Juan Fernández	280
Valparaíso	Valparaíso	15454
	Viña del Mar	16068
	Concón	1807
San Antonio	San Antonio	7366
	Lolleo	1134
Rancagua	Rancagua	34745
	Machalli	23419
	San Vicente	23419
San Fernando	Chépica	13759
	San Fernando	13759
Pichilemu	Pichilemu	1920
	Litueche	1920
	Paredones	1920
Talca	Cauquenes	29787
	Pelluhue	10300
	Curicó	101661
Cauquenes	Cauquenes	18504
	Pelluhue	5250
Curicó	Curicó	49123
	Molina	18147
	Teno	18147

Linares	Linares	41079
	Longavi	24250
	Parral	24250
Concepción	Concepción	197725
	Tomé	45331
	Coronel	93716
	Talcahuano	130451
Lebu	Lebu	22050
	Arauco	35649
Los Ángeles	Los Ángeles	82950
	Yumbel	18681
	Mulchen	22028
Chillán	Chillán	77280
	Yungay	38640
	San Nicolás	38640
Temuco	Temuco	29249
	Villarica	15209
	Padre las Casas	15209
Provincia Mallerco	Angol	10154
	Victoria	5077
	Collipulli	4870

Alimentos no perecibles-Terrestre		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad
San Joaquín	Zona Metropolitana de Santiago	2940
	Juan Fernández	42
Valparaíso	Valparaíso	2318
	Viña del Mar	2410
	Concón	271
San Antonio	San Antonio	1104
	Llolleo	170
Rancagua	Rancagua	5211
	Machalli	3512
	San Vicente	3512
San Fernando	Chépica	2063
	San Fernando	2063
Pichilemu	Pichilemu	288
	Litueche	288
	Paredones	288
Talca	Constitución	4468
	Pelarco	1545
	Talca	15249
Cauquenes	Cauquenes	2775
	Pelluhue	787
Curicó	Curicó	7368
	Molina	2722
	Teno	2722

Linares	Linares	6161
	Longavi	3637
	Parral	3637
Concepción	Concepción	29658
	Tomé	6799
	Coronel	14057
	Talcahuano	19567
Lebu	Lebu	3307
	Aracuco	5347
Los Ángeles	Los Ángeles	12442
	Yumbel	2802
	Mulchen	3304
Chillán	Chillán	11592
	Yungay	5796
	San Nicolás	5796
Temuco	Temuco	4387
	Villarica	2281
	Padre las Casas	2281
Provincia Malleco	Angol	1523
	Victoria	761
	Collipulli	730



Productos Personales-Terrestre		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad
San Joaquín	Zona Metropolitana de Santiago	448
	Juan Fernández	6
Valparaíso	Valparaíso	353
	Viña del Mar	367
	Concón	41
San Antonio	San Antonio	168
	Llolleo	25
Rancagua	Rancagua	794
	Machalli	535
	San Vicente	535
San Fernando	Chépica	314
	San Fernando	314
Pichilemu	Pichilemu	43
	Litueche	43
	Paredones	43
Talca	Constitución	680
	Pelarco	235
	Talca	2323
Cauquenes	Cauquenes	422
	Pelluhue	120
Curicó	Curicó	1122
	Molina	414
	Teno	414

Linares	Linares	938
	Longavi	554
	Parral	554
Concepción	Concepción	4519
	Tomé	1036
	Coronel	2142
	Talcahuano	2981
Lebu	Lebu	504
	Aracuco	814
Los Ángeles	Los Ángeles	1896
	Yumbel	427
	Mulchen	503
Chillán	Chillán	1766
	Yungay	883
	San Nicolás	883
Temuco	Temuco	668
	Villarica	347
	Padre las Casas	347
Provincia Malleco	Angol	232
	Victoria	116
	Collipulli	111

Medicamentos-Marítimo		
Centro de Acopio	Zona Afectada	Cantidad
San Joaquín	Zona Metropolitana de Santiago	89
	Juan Fernández	1
Valparaíso	Valparaíso	70
	Viña del Mar	73
	Concón	8
San Antonio	San Antonio	33
	Llole	5
Rancagua	Rancagua	158
	Machali	107
	San Vicente	107
San Fernando	Chépica	62
	San Fernando	62
Pichilemu	Pichilemu	8
	Litueche	8
	Paredones	8
Talca	Constitución	136
	Pelarco	47
	Talca	464
Cauquenes	Cauquenes	84
	Pelluhue	24
Curicó	Curicó	224
	Molina	82
	Teno	82

Linares	Linares	187
	Longavi	110
	Parral	110
Concepción	Concepción	903
	Tomé	207
	Coronel	428
	Talcahuano	596
Lebu	Lebu	100
	Aracuco	162
Los Ángeles	Los Ángeles	379
	Yumbel	85
	Mulchen	100
Chillán	Chillán	353
	Yungay	176
	San Nicolás	176
Temuco	Temuco	133
	Villarica	69
	Padre las Casas	69
Provincia Malleco	Angol	46
	Victoria	23
	Collipulli	22