

## **MODELO MULTIOBJETIVO DE DISTRIBUCION Y LOCALIZACION DE CENTROS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS**

Andrés Bronfman C., Rodrigo A. Garrido  
Departamento de Ingeniería de Transporte  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Casilla 306, Código 105, Santiago 22, Chile  
Tel: (56-2) 686-4270, Fax: (56-2) 553-0281  
e-mail: [rgarrido@ing.puc.cl](mailto:rgarrido@ing.puc.cl)

### **RESUMEN**

El incremento en la generación de residuos peligrosos como subproducto de la actividad industrial conlleva a la necesidad de establecer centros especializados para su tratamiento y posterior disposición final, siendo imprescindible identificar técnicas adecuadas para localizar óptimamente estas instalaciones. Sin embargo, a pesar de que este tipo de instalaciones presenta un potencial peligro tanto para la población cercana como para el medio ambiente, son un componente requerido por el estilo de vida contemporáneo.

En este estudio se establece una metodología que aborda el problema de localización de centros de tratamiento (CT) de residuos sólidos industriales peligrosos (RSIP) junto con la distribución de estos residuos entre los distintos pares origen-destino sobre una red de transporte. Los objetivos considerados son la minimización de los costos del sistema (costos asociados al transporte e implementación de CT), el número esperado de accidentes en el proceso de descarga, y la consecuencia asociada a estos accidentes. Se desarrolla un modelo estratégico de programación multiobjetivo para resolver el problema, presentando su aplicación al traslado de RSIP en la ciudad de Santiago de Chile.

## 1. INTRODUCCION

Dentro de la logística asociada a los materiales peligrosos existen diversas causas de accidente. Usualmente se asume que estos incidentes sólo se producen sobre la ruta que une un par O-D preestablecido, sin considerar el proceso de descarga del producto en el destino. Se estima que cerca del 56% de los accidentes producidos en el transporte de materiales peligrosos se producen en el proceso de descarga [RSPA (1993-2001)]. Estos antecedentes confirman la necesidad de establecer centros de tratamiento (CT) cuidadosamente localizados con la finalidad de disminuir no sólo los costos de transporte e implementación de CT, sino también las probabilidades de ocurrencia de un accidente catastrófico y las consecuencias asociadas a estos sucesos. De esta forma se tiene un problema con múltiples objetivos, en el cual no siempre es posible identificar una mejor solución (es decir, una alternativa que se desempeñe mejor que el resto con respecto a todos los criterios). En cambio, la meta se centra en identificar el conjunto de soluciones “no-dominadas” Pareto-óptimas de modo que el intercambio entre diferentes objetivos pueda ser específicamente representado.

Este trabajo propone un modelo de programación multiobjetivo que permite establecer en forma conjunta la localización de CT y distribución de los RSIP entre los centros generadores y atractores, minimizando los costos de transporte e implementación de CT, el número esperado de accidentes catastróficos en el proceso de descarga, y la consecuencia asociada a dicho suceso.

El resto de este trabajo se ordena como sigue: a continuación se exponen los principales enfoques abordados en la literatura para resolver este tipo de problemas. En el Capítulo III se esboza el problema de localización de CT como un problema decisonal, presentando luego una metodología multicriterio y de programación multiobjetivo para resolverlo. Finalmente, en el Capítulo V se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación del método propuesto en la Región Metropolitana de Santiago de Chile.

## 2. REVISION BIBLIOGRAFICA

Aunque las industrias potencialmente peligrosas son indeseables desde un punto de vista de seguridad pública y ambiental, sus servicios (ej. Plantas de tratamiento o disposición segura de residuos peligrosos) son componentes requeridos por el estilo de vida contemporáneo. Así, el primer paso es la identificación de la región geográfica a la cual servirá la industria indeseable. Esto facilita la estimación de los tipos y volúmenes de MP que deben ser tratados. Dada el área a ser servida y el tipo de servicio provisto, la planificación de instalaciones involucra decisiones con respecto al número de instalaciones a ser establecidas, su ubicación, tamaño, y la distribución de las industrias que demandan zonas. El sistema diseñado debe tener capacidad suficiente para servir toda la región, y el servicio debe suministrarse tal que se minimicen los costos e impactos adversos.

A pesar de la naturaleza multiobjetivo del problema, los primeros enfoques se restringen al desarrollo de modelos con un sólo objetivo, principalmente maximizando alguna función de distancia entre las instalaciones y la población. Erkut y Neuman (1989) proporcionan una revisión de estos modelos de localización. Los enfoques predominantes son la maximización de la suma de las distancias y la maximización de la distancia mínima. Sin embargo, estos modelos

con un sólo objetivo son generalmente inadecuados para modelar problemas de localización de industrias peligrosas, que se caracterizan por múltiples agentes involucrados en el proceso y múltiples objetivos. Una buena referencia en este tema se presenta en Drezner (1995) y List *et al.* (1991), en donde se aborda en forma detallada una gran cantidad de métodos y modelos de localización para distintas situaciones.

Reconociendo la naturaleza multiobjetivo del problema, Zografos y Samara (1989) introducen un modelo de localización y ruteo combinado para el transporte y eliminación de residuos peligrosos. Consideran tres objetivos: minimizar el riesgo de transporte, minimizar el tiempo de viaje, y minimizar el riesgo de eliminación. Utilizan la programación por metas excluyente para generar un número de soluciones bajo escenarios alternativos. Reville *et al.* (1991) desarrolla un modelo para localizar instalaciones de almacenaje y seleccionar rutas para embarques de residuos nucleares considerando dos objetivos: minimizar el transporte de carga (toneladas/milla) y el riesgo percibido. Para resolver el problema se combinan métodos de ruta mínima, un modelo binario de programación matemática para localizar y el método de ponderaciones multiobjetivo. List y Mirchandani (1991) también presentan un marco metodológico para considerar en forma simultánea las decisiones de ruteo y localización de materiales peligrosos. El modelo considera cuatro criterios: riesgo total, máximo riesgo por persona, costos de transporte, y costos de las instalaciones de tratamiento. Mas recientemente, Giannikos (1998) expone un modelo multiobjetivo para localizar instalaciones de tratamiento o eliminación conjuntamente con el transporte de residuos peligrosos. Considera cuatro objetivos: minimizar los costos totales de operación, minimizar el riesgo total percibido, la distribución equitativa del riesgo entre los centros poblacionales, y la distribución equitativa de la desutilidad causada por la operación de las instalaciones de tratamiento. Para resolver el problema desarrolla un modelo de programación por metas.

### 3. MODELO DE LOCALIZACION Y DISTRIBUCION

Se considera la Red de Transporte bajo análisis representada por un grafo dirigido  $G(N,A)$ , donde  $N$  es el conjunto de nodos y  $A$  el conjunto de arcos. Además, sea  $O$  el conjunto de orígenes (generadores de materiales peligrosos) y  $D$  el conjunto de destinos (atractores de dichos materiales).

Para todo  $j \in D$ , sea  $Co_j$  la consecuencia en que se incurre cuando un accidente ocurre en el proceso de descarga del material peligroso. Se entenderá por accidente catastrófico a aquel que tiene una consecuencia mayor o igual a  $C^*$ , un valor predeterminado y conocido como “valor o nivel crítico”. De esta forma, sea  $NE_j$  el número esperado de accidentes catastróficos (es decir, el número esperado de camiones accidentados con características catastróficas) en el proceso de descarga del material.

Asimismo, sea  $C_j$  el costo de implementar un CT en el nodo  $j \in D$ , y  $C_{ij}$  el costo asociado al traslado del material desde un nodo  $i \in O$  al nodo  $j \in D$ .

Se definen las siguientes variables de decisión:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo } i \in O \text{ remite el RSIP generado al nodo } j \in D \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \forall i \in O, j \in D$$

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo } j \in D \text{ es abierto para recibir RSIP} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \forall j \in D$$

Donde  $G_i$  es la generación de RSIP que debe ser transportado desde el origen  $i \in O$ . El problema de localización de CT y distribución de RSIP puede entonces ser formulado como un modelo de programación matemática discreto de la siguiente forma:

$$\text{Min } \left\{ f_1 = \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} C_{ij} G_i x_{ij}, \quad f_2 = \sum_{j \in D} C_j z_j, \quad f_3 = \sum_{j \in D} N E_j z_j, \quad f_4 = \sum_{j \in D} C o_j z_j \right\} \quad (1)$$

Sujeto a:

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

$$x_{ij} \leq z_j \quad \forall i \in O, \forall j \in D \quad (3)$$

$$\sum_{i \in O} G_i x_{ij} \leq Q_j z_j \quad \forall j \in D \quad (4)$$

$$\sum_{j \in D} z_j \leq q \quad (5)$$

$$x_{ij}, z_j \text{ Binario} \quad \forall i \in O, \forall j \in D \quad (6)$$

Donde  $Q_j$  y  $q$  representan la capacidad del nodo  $j \in D$  y el número máximo de CT a implementar, respectivamente. Se define  $F$  como el conjunto de restricciones (2)-(6), con  $X$  y  $Z$  los vectores de las variables de decisión  $x_{ij}$  y  $z_j$ , respectivamente. Las condiciones (2) indican que todos los residuos que se generan en un nodo  $i \in O$  deben ser transportados a un sólo destino  $j \in D$ . A su vez, las restricciones (3) impiden que se envíen RSIP a un nodo  $j \in D$  en el cual no se haya abierto o implementado un CT. Las desigualdades (4) y (5) indican que la totalidad de RSIP que llega a un destino  $j \in D$  no puede sobrepasar la capacidad de éste y que a lo más pueden instalarse  $q$  centros de tratamiento, respectivamente. Las condiciones (6) representan la no-negatividad e integridad de las variables de decisión.

En el problema propuesto surge la necesidad de determinar el grado de importancia o preferencia de cada uno de los objetivos. Esta necesidad se debe a que es erróneo pensar que cada uno de estos objetivos tiene la misma importancia en el momento de determinar si un CT es implementado o no, por lo que el método planteado se transforma en un “problema decisional” en el cual hay que incluir ponderadores que reflejen la relevancia y preferencia que se proporciona a cada atributo en el proceso de optimización. Por otro lado, existen conflictos que surgen entre cada objetivo, lo cual se refleja en que algunos de estos carecen de homogeneidad dimensional y que los valores absolutos de los resultados de los diferentes objetivos pueden ser muy diferentes, obteniéndose soluciones sesgadas hacia aquellos que pueden alcanzar valores mayores. Frente a esta problemática, se propone resolver el problema mediante análisis decisional multicriterio y programación multiobjetivo, tema que se describe en la siguiente sección.

## 4. ANALISIS MULTICRITERIO Y PROGRAMACION MULTIOBJETIVO

### 4.1. Evaluación Multicriterio

El proceso o enfoque tradicional para abordar este tipo de problemas puede resumirse de la siguiente forma [Romero (1993) y Steuer (1986)]: El valor de las variables de decisión que satisfacen las restricciones constituyen lo que se denomina *conjunto factible* o *alcanzable* que determinan lo que se entiende por “soluciones posibles”. Una vez determinadas estas soluciones, el interés se centra en identificar la “mejor solución”. Para ello se define una *función de criterio* que refleja adecuadamente las decisiones de preferencias o deseos. Esta función de criterio, llamada también función de utilidad, asocia de una manera monótona un número real a cada solución factible. Recurriendo a técnicas matemáticas se optimiza la función de utilidad sobre el conjunto factible, obteniendo de esta manera la solución óptima.

En la primera fase, y a partir de información cuantitativa, se definen las “posibles soluciones”, mientras que en la segunda fase los juicios preferenciales definen la “mejor solución”. La intersección de ambas fases determina la solución óptima. Para determinar el conjunto de posibles soluciones se utiliza el concepto de Optimalidad Paretiana, el cual señala que: “Un conjunto de soluciones es eficiente (o Pareto óptima) cuando está formado por soluciones factibles (cumplen con las restricciones), tales que no exista otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos”. Puede decirse que la eficiencia paretiana es una condición exigida y necesaria para garantizar la racionalidad de las soluciones generadas por los diferentes enfoques multicriterio, los que pretenden obtener soluciones que sean eficientes en el sentido paretiano sin considerar la posibilidad de encontrar una solución óptima, sino que un conjunto de soluciones eficientes no dominadas. A un nivel operativo, este tipo de problemas puede concebirse como una secuencia de pasos en las que en todo momento es necesario elegir entre diferentes alternativas.

Para establecer el conjunto de soluciones pareto óptimas (primera fase del problema) se recurre al Método de las Ponderaciones, y para definir la mejor solución (segunda fase) se ha seleccionado el método de Programación Compromiso.

### 4.2. Programación Multiobjetivo (Método de Ponderaciones)

Como la optimización simultánea de todos los objetivos es usualmente imposible, el enfoque multiobjetivo pretende establecer el conjunto de soluciones eficientes o pareto óptimas. Para generar este conjunto pareto óptimo se utiliza el método de las ponderaciones, que consiste en multiplicar cada objetivo por un peso o factor no negativo, para luego incluir todos los objetivos ponderados en una única función agregada. La optimización de dicha función genera un elemento del conjunto eficiente. Por medio de la parametrización de los pesos asociados a los objetivos se va aproximando el conjunto de soluciones pareto óptimas. Sin embargo, es esencial proceder a la normalización de los diferentes criterios en consideración para establecer homogeneidad dimensional y evitar soluciones sesgadas hacia aquellos objetivos que pueden alcanzar mayores valores. Una forma de lograr esto es dividiendo los valores que alcanza el criterio por su recorrido. Se entiende por recorrido la diferencia entre el “mejor” y el “peor” valor alcanzado por

cada uno. La aplicación del método conduce al siguiente programa lineal paramétrico normalizado:

$$\text{Min } L(X, Z) = \alpha_1 \sum_i \left( \frac{f_{1i}}{f_{*1i} - f_{1i}^*} \right) + \alpha_2 \left( \frac{f_2}{f_{*2} - f_2^*} \right) + \alpha_3 \left( \frac{f_3}{f_{*3} - f_3^*} \right) + \alpha_4 \left( \frac{f_4}{f_{*4} - f_4^*} \right) \quad (7)$$

Sujeto a:

$$f_{1i} = \sum_j C_{ij} G_i x_{ij} \quad \forall i \in O \quad (8)$$

$$f_2 = \sum_j C_j z_j \quad (9)$$

$$f_3 = \sum_j NE_j z_j \quad (10)$$

$$f_4 = \sum_j Co_j z_j \quad (11)$$

$$X, Z \in F \quad (12)$$

Las primeras cuatro restricciones corresponden a los atributos definidos en el capítulo anterior. Se define  $F^*$  como el conjunto de restricciones  $F$  más las expresiones de los atributos recién mencionadas.

Para cada vector de pesos  $\alpha$  (con  $\alpha \geq 0$ ) se obtiene un elemento del conjunto eficiente. El término  $f_{*j}$  es el *anti-ideal* de dicho objetivo, es decir el peor valor posible para el objetivo  $j$ -ésimo sobre el conjunto eficiente, y  $f_j^*$  es el *ideal* o mejor valor posible para el objetivo  $j$ -ésimo. Las coordenadas de la alternativa ideal vienen dadas por los valores óptimos de los correspondientes objetivos, forzando el proceso de optimización al cumplimiento de las restricciones del problema.

Hasta ahora, puede considerarse que sólo se ha presentado la primera etapa del proceso decisional. La aplicación del método predicho permite particionar el conjunto factible en un subconjunto de soluciones pareto-eficientes o no dominadas sin considerar las decisiones de preferencia. Una forma eficiente de incorporar estas preferencias es mediante la Programación Compromiso desarrollada en sus inicios por Yu (1973) y Zeleny (1974).

### 4.3. Método de Programación Compromiso

El primer paso dentro del enfoque compromiso consiste en establecer el punto o alternativa ideal. Al ser este punto inalcanzable, la elección óptima o mejor solución compromiso viene dada por la solución eficiente más próxima al punto ideal. Esta regla de comportamiento suele denominarse *axioma de Zeleny*. De acuerdo con este postulado, dadas las soluciones  $f^{(1)}$  y  $f^{(2)}$ , la solución elegida (óptima) será aquella que se encuentre más próxima al punto ideal. Dependiendo de la métrica que se elija se obtendrán diferentes funciones de distancia, lo que permitirá establecer diferentes conjuntos compromiso. Para abordar tal tarea, se define el grado de proximidad normalizado  $d_j$  existente entre el objetivo  $j$ -ésimo y su ideal como:

$$d_j = \frac{f_j^* - f_j(\cdot)}{f_j^* - f_{*j}} \quad (13)$$

El grado de proximidad normalizado está acotado entre 0 y 1. Así, cuando un objetivo alcanza su valor ideal, su grado de proximidad es cero; por el contrario, dicho grado se hace igual a uno cuando el objetivo en cuestión alcanza un valor igual al anti-ideal. Ahora, haciendo uso de la metodología propuesta por Romero (1993), y definiendo  $W_j$  como las decisiones preferenciales que se asocian a la discrepancia existente entre la realización del objetivo  $j$ -ésimo y su ideal, la programación compromiso se convierte en el siguiente problema de optimización:

$$Min L_\pi = \left[ W_1^\pi \sum_i \left( \frac{f_{1i} - f_{1i}^*}{f_{*1i} - f_{1i}^*} \right)^\pi + W_2^\pi \left( \frac{f_2 - f_2^*}{f_{*2} - f_2^*} \right)^\pi + W_3^\pi \left( \frac{f_3 - f_3^*}{f_{*3} - f_3^*} \right)^\pi + W_4^\pi \left( \frac{f_4 - f_4^*}{f_{*4} - f_4^*} \right)^\pi \right]^{1/\pi} \quad (14)$$

Sujeto a:

$$X, Z \in F^*$$

El parámetro  $\pi$  representa la métrica que define la familia de funciones de distancia. Es decir, para cada valor del parámetro  $\pi$  se tendrá una distancia en concreto. Así, la distancia tradicional o euclidiana es un caso particular de la expresión anterior; esto es, el que corresponde a  $\pi = 2$ . Para  $\pi = 1$  se alcanza la mejor solución compromiso, o punto más próximo al ideal, y se puede obtener resolviendo el siguiente problema de optimización:

$$Min L_1 = \sum_{j=1}^4 W_j \cdot \frac{f_j^* - f_j(\cdot)}{f_j^* - f_{*j}} \quad (15)$$

Sujeto a:

$$X, Z \in F^*$$

Para la métrica  $\pi = \infty$  se minimiza la máxima desviación de entre todas las desviaciones individuales. Para esta métrica, la mejor solución compromiso, o punto más próximo al ideal, se puede obtener resolviendo el siguiente problema de optimización:

$$Min L_\infty = D \quad (16)$$

S.a:

$$W_1 \cdot \left( \frac{f_{1i} - f_{1i}^*}{f_{*1i} - f_{1i}^*} \right) \leq D \quad \forall i \in O \quad (17)$$

$$W_2 \cdot \left( \frac{f_2 - f_2^*}{f_{*2} - f_2^*} \right) \leq D \quad (18)$$

$$W_3 \cdot \left( \frac{f_3 - f_3^*}{f_{*3} - f_3^*} \right) \leq D \quad (19)$$

$$W_4 \cdot \left( \frac{f_4 - f_4^*}{f_{*4} - f_4^*} \right) \leq D \quad (20)$$

$$X, Z \in F^*$$

Es decir, la solución asociada al punto  $L_\infty$  es una solución bien equilibrada, pues las discrepancias ponderadas y normalizadas entre el valor alcanzado por cada objetivo y sus respectivos ideales son iguales. Puede decirse que la solución  $L_1$  corresponde a una situación en la que se minimiza

la suma ponderada de los logros de cada objetivo, traduciéndose en algo así como en un punto de máxima eficiencia, pero que puede estar fuertemente desequilibrado. Por el contrario, en la solución  $L_\infty$  subyace una lógica de equilibrio. Para obtener la mejor solución compromiso para métricas distintas de  $\pi = 1$  y  $\pi = \infty$  se hace necesario recurrir a algoritmos de programación matemática no lineal.

Mediante esta metodología es posible comparar cada alternativa del conjunto eficiente encontrado por el método de las ponderaciones. Calculando los valores  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_\infty$  para cada alternativa pareto óptima, es posible clasificar las soluciones en orden ascendente a los valores encontrados para cada métrica, culminando de esta forma el segundo paso del problema decisional planteado.

## 5. APLICACION DEL MODELO DE LOCALIZACION-DISTRIBUCION

La metodología propuesta fue utilizada sobre la Región Metropolitana (RM) de la Ciudad de Santiago de Chile. La red considerada cuenta con 27 centroides comunales o generadores de RSIP, 6 nodos atractores (posibles centros de tratamiento) de los cuales dos se encuentran en funcionamiento (Figura 1), y 162 rutas que unen los pares  $O-D$ . Las rutas corresponden a la línea recta que une cada par de nodos, lo que es considerado una buena aproximación en el ámbito estratégico. Sobre esta red se considera que cada cargamento es recolectado y transportado con una misma tecnología, por lo que el tipo de vehículo en el modelo propuesto es predeterminado e igual para cada tipo de carga. Para cada centroide comunal se dispone de la generación de residuos [Garrido y Bronfman (2003)], desagregados por tipo de cargamento caracterizado según grado de peligrosidad, por las probabilidades asociadas a la ocurrencia de un accidente en el proceso de descarga y por su consecuencia asociada [ver Bronfman y Garrido (2003)]. El modelo fue aplicado para el año base (1995) y para los cortes temporales dados por los años 2000, 2005 y 2010. El cálculo de centroides comunales, tipos de cargamento de RSIP, costos unitarios de transporte y costos de implementación de CT pueden ser consultados en Bronfman (2001) Capítulos 9 y 10.

**Tabla 1**  
**Pesos para el Conjunto Eficiente Mediante el Método de las Ponderaciones**

Pesos	Casos									
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
$\alpha_1$	1,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,00
$\alpha_2$	0,00	1,00	0,00	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,00
$\alpha_3$	0,00	0,00	1,00	0,00	0,47	0,35	0,23	0,12	0,00	0,58
$\alpha_4$	0,00	0,00	0,00	1,00	0,33	0,25	0,17	0,08	0,00	0,42

Los pesos utilizados para generar el conjunto de soluciones factibles son los que se muestran en la Tabla 1. Para determinar estos ponderadores se consideró que el parámetro de los costos de implementación de CT y transporte son iguales, y que el porcentaje restante se divide en un 34% para el número esperado de accidentes catastróficos y 26% para la consecuencia en que se incurre.

Para la identificación de la alternativa óptima, y según lo señalado en Bronfman (2001), es posible establecer los siguientes ponderadores ( $W_j$ ) que reflejan el grado de importancia que se

les asigna a cada objetivo:  $W_1 = 0,20$ ;  $W_2 = 0,20$ ;  $W_3 = 0,36$ ;  $W_4 = 0,24$ . Donde  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  y  $W_4$  representan las preferencias asociadas a los costos de transporte, costo de implementación, consecuencia incurrida y número esperado de accidentes catastróficos, respectivamente.

La tipificación del conjunto eficiente a través del método de las ponderaciones y análisis de dominancia, y la identificación de la alternativa óptima mediante la programación compromiso, fue implementada para los años 1995, 2000, 2005 y 2010. La generación de RSIP difiere en cada uno de estos cortes temporales, por lo que la combinación de CT a implementar puede cambiar para cada año en cuestión. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
**Distribución de RSIP desde Centros Generadores (Comunas) a Centros de Tratamiento por Corte Temporal y Alternativa Óptima**

Comuna	1995	2000	2005	2010	Comuna	1995	2000	2005	2010
	(Alt. B)	(Alt. F)	(Alt. K)	(Alt. O)		(Alt. B)	(Alt. F)	(Alt. K)	(Alt. O)
	CT	CT	CT	CT		CT	CT	CT	CT
Cerrillos	2	4	2	2	Nuñoa	2	3	2	2
Cerro Navia	2	3	2	2	Peñalolén	2	3	2	2
Conchali	2	2	2	4	Providencia	2	3	2	2
Est. Central	2	3	2	2	Pudahuel	4	2	2	4
Huechuraba	2	3	2	4	Puente Alto	2	3	2	6
Independencia	2	3	2	2	Quilicura	4	3	3	3
La Cisterna	2	3	2	2	Quinta Normal	2	3	2	2
La Florida	2	3	2	2	Recoleta	2	3	2	2
La Granja	2	3	2	2	Renca	2	2	2	4
La Pintana	2	4	2	2	San Bernardo	2	4	6	2
La Reina	2	3	2	2	San Joaquín	2	3	2	2
Lo Prado	2	3	2	2	San Miguel	2	3	2	2
Macul	2	3	2	2	Santiago	2	3	2	2
Maipú	2	4	4	6					

Para el año base (1995), la mejor solución corresponde a la alternativa B (CT 2 y 4) cuya configuración minimiza la suma ponderada de los logros de cada objetivo, traduciéndose en un punto de máxima eficiencia y a su vez subyace una lógica de equilibrio entre los objetivos. Para el primer corte temporal (2000) se encuentra una solución eficiente al minimizar el grado de proximidad de cada objetivo ( $L_\infty$ ), sin embargo, no corresponde a la alternativa que presenta la mayor equidad entre cada criterio. La solución encontrada es compatible con la obtenida para el año base, con la diferencia de que en el actual resultado se incorpora el CT 3. Para el año 2005 se produce un nuevo aumento en el número de CT necesarios para abastecer el total de RSIP a tratar, presentándose combinaciones de cuatro CT. En este caso, la solución óptima corresponde a la alternativa K para cada métrica considerada, la que vuelve a estar relacionada con los resultados anteriores, incorporándose el CT 6. En el último corte temporal (2010), la configuración encontrada concuerda con la obtenida para el año 2005, representando una lógica consecuente en el tiempo con respecto a la incorporación de nuevos centros de tratamiento. Los resultados para la distribución de flujos se exponen en la Tabla 3.

Dentro de las soluciones encontradas para cada año no aparece como una alternativa viable el CT 1, actualmente en funcionamiento. Esto se debe al lugar geográfico en el que se encuentra inserto (dentro de una zona urbana), por lo que las consecuencias asociadas a un accidente catastrófico en dicho centro implicaría costos muy elevados. Esta situación confirma en cierta forma uno de los intereses relevantes en la aplicación de esta metodología, representada por la importancia

(preferencia) que se asignó a cada objetivo. Dentro de estas preferencias se consideró que la consecuencia en la que se incurre frente a un accidente catastrófico ( $Co_j$ ) tiene un nivel de importancia del 36%, y la probabilidad de que ocurra este suceso ( $NE_j$ ) en un 24%. Ahora bien, estando el CT 1 dentro de una zona urbana, el costo asociado al transporte ( $C_{ij}$ ) es el menor dentro de todas las alternativas disponibles. Sin embargo presenta un  $NE_j$  y una  $Co_j$  mayor con respecto al resto de las alternativas. En conclusión, la no-incorporación de este CT dentro de las alternativas óptimas encontradas confirma que la metodología desarrollada cumple con los objetivos propuestos al minimizar  $NE_j$ ,  $Co_j$ ,  $C_j$  y  $C_{ij}$  para la red considerada.

**Tabla 3**  
**Conjunto Eficiente Para el Año Base y Cortes Temporales**

Conjunto Eficiente para el Año Base (1995)					
Alternativa	CTr (\$/año)	C (\$/año)	NE (Acc./año)	Co (\$/Acc.)	Centros Trat.
A	2.73E+07	6.71E+08	3.17E-04	2.22E+09	1-2
B	1.05E+08	1.58E+09	3.17E-04	5.25E+07	2-4
C	5.46E+07	1.14E+09	3.00E-04	5.46E+08	3-4
Mínimo	2.73E+07	6.71E+08	3.00E-04	5.25E+07	
Orden de Alternativas (1995)					
L <sub>1</sub>		B	A	C	
L <sub>2</sub>		B	C	A	
L <sub>∞</sub>		B	C	A	

Conjunto Eficiente para el Año Base (2000)					
Alternativa	CTr (\$/año)	C (\$/año)	NE (Acc./año)	Co (\$/Acc.)	Centros Trat.
D	9.47E+07	1.46E+09	4.76E-04	2.26E+09	1-2-5,
E	5.82E+07	1.47E+09	4.76E-04	2.26E+09	1-2-6,
F	1.20E+08	1.93E+09	4.59E-04	5.83E+08	2-3-4,
G	8.73E+07	1.93E+09	4.59E-04	5.87E+08	2-4-6,
H	1.38E+08	2.38E+09	4.76E-04	9.29E+07	3-4-6,
Mínimo	5.82E+07	1.46E+09	4.59E-04	9.29E+07	
Orden de Alternativas (2000)					
L <sub>1</sub>	G	F	E	D	H
L <sub>2</sub>	G	F	H	E	D
L <sub>∞</sub>	F	G	H	E	D

Conjunto Eficiente para el Año Base (2005)					
Alternativa	CTr (\$/año)	C (\$/año)	NE (Acc./año)	Co (\$/Acc.)	Centros Trat.
I	1.43E+08	2.25E+09	6.35E-04	2.28E+09	1-2-4-5
J	1.15E+08	2.26E+09	6.35E-04	2.27E+09	1-2-4-6
K	1.41E+08	2.73E+09	6.18E-04	6.24E+08	2-3-4-6
L	2.14E+08	3.17E+09	6.35E-04	1.36E+08	3-4-5-6
Mínimo	1.15E+08	2.25E+09	6.18E-04	1.36E+08	
Orden de Alternativas (2005)					
L <sub>1</sub>		K	J	I	L
L <sub>2</sub>		K	L	I	J
L <sub>∞</sub>		K	L	J	I

Conjunto Eficiente para el Año Base (2005)					
Alternativa	CTr (\$/año)	C (\$/año)	NE (Acc./año)	Co (\$/Acc.)	Centros Trat.
I	1.43E+08	2.25E+09	6.35E-04	2.28E+09	1-2-4-5
J	1.15E+08	2.26E+09	6.35E-04	2.27E+09	1-2-4-6
K	1.41E+08	2.73E+09	6.18E-04	6.24E+08	2-3-4-6
L	2.14E+08	3.17E+09	6.35E-04	1.36E+08	3-4-5-6
Mínimo	1.15E+08	2.25E+09	6.18E-04	1.36E+08	
Orden de Alternativas (2005)					
L <sub>1</sub>		K	J	I	L
L <sub>2</sub>		K	L	I	J
L <sub>∞</sub>		K	L	J	I

## 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

En este artículo se presentó un modelo multiobjetivo para la localización de centros de tratamiento (CT) y distribución de residuos peligrosos. Entre los objetivos considerados se encuentran: los costos asociados al transporte e implementación de CT, el número esperado de accidentes en el proceso de descarga y la consecuencia asociada a estos accidentes, todo bajo un contexto urbano. La metodología fue implementada en la Región Metropolitana de Santiago de Chile, identificando un conjunto de alternativas no-dominadas para la localización de CT para los distintos cortes temporales considerados. La incorporación de nuevos CT en cada configuración presentó una lógica consecuente a través del tiempo. Los resultados indican que la metodología propuesta es una herramienta viable y puede proporcionar información útil para los tomadores de decisión al seleccionar la localización de un CT.

El modelo propuesto se puede realzar a lo largo de varias direcciones. Por ejemplo, se podría identificar un índice de peligrosidad para diferenciar los distintos tipos de cargamento peligroso.

De esta forma, las cargas más peligrosas se deberían asignar a zonas menos riesgosas, y viceversa. Adicionalmente, es recomendable considerar la equidad en la distribución espacial del riesgo dentro del modelo multiobjetivo, ya que al asignar todos los cargamentos a una sola ruta se estaría exponiendo siempre a la misma población a los riesgos asociados a esta actividad. Para abordar este problema se pueden utilizar técnicas de ruteo multiproducto (identificando un conjunto de rutas entre cada par O-D), y restricciones de riesgo zonales y sobre los arcos de la red de transporte. Tales consideraciones, junto con estudios de cálculo más detallados, se recomiendan para futuras investigaciones.

## REFERENCIAS

- Bronfman, C. A. (2001) **Generación de Residuos Sólidos Industriales Peligrosos en la Región Metropolitana, Sistema de Ruteo y Localización de Centros de Tratamiento**. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Industrial Especialidad Ingeniería de Transporte, Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Bronfman, C. A. y Garrido, R. A. (2003) **Probabilidades y Consecuencias Asociadas a Eventos Catastróficos en el Transporte de Materiales Peligrosos**. Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Drezner, Z. (1995) **Facility Location: A Survey of Applications and Methods**. Springer Series in Operations Research, Springer-Verlag, New York.
- Erkut, E. y Neuman, S. (1989) Analytical Models for Locating Undersirable Facilities. **European Journal of Operation Research**, **40**, 275-291.
- Garrido, R. A. y Bronfman, C. A. (2003) **Generation and Distribution Hazmat Within Urban Limits**. Department of Transport Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Giannikos, I. (1998) A Multiobjective Programming Model For Locating Treatment Sites and Routing Hazardous Wastes. **European Journal of Operational Research**, **104**, 333-342.
- List, G. y Mirchandani, P. B. (1991) An Integrated Network/Planar Multiobjective Model for Routing and Siting for Hazardous Materials and Wastes. **Transportation Science**, **25**, 146-156.
- List, G. F., Mirchandani, P. B., Turnquist, M. A. y Zografos, K. G. (1991) Modeling and Analysis for Hazardous Materials Transportation: Risk Analysis, Routing/Scheduling and Facility Location. **Transportation Science**, **25**, 100-114.
- Revelle, C., Cohon, J. y Shobrys, D. (1991) Simultaneous Siting and Routing in the Disposal of Hazardous Wastes. **Transportation Science**, **25**, 138-145.
- Romero, C. (1993) Análisis de las Decisiones Multicriterio. **Series Monográficas de Ingeniería de Sistemas**, Isdefe 4<sup>o</sup> Edición.

RSPA (1993-2001) **Hazmat Summary by State for Calendar Year**. Research & Special Programs Administration (R.S.P.A). Office of Hazardous Materials Safety, The United States Department of Transportation's Research and Special Programs Administration.

Steuer, E. (1986) **Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application**. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Yu, P. L. (1973) A Class of Solutions For Group Decisions Problems. **Management Science**, **19**, 936-946.

Zeleny, M. (1974) A Concept of Compromise Solutions and The Method of the Displaced Ideal. **Computers and Operations Research**, **1**, 479-496.

Zografos, K. G. y Samara, S. (1989) A Combined Location-Routing Model for Hazardous Waste Transportation and Disposal. **Transportation Research Record**, **1245**, 52-59.

