

# LA DECISIÓN DE LOCALIZACIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO

## THE FACILITY LOCATION DECISIONS IN THE SUPPLY CHAIN

*RAÚL HUMBERTO ARANEDA MARTÍNEZ*  
*REINALDO JAVIER MORAGA SUAZO*

Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile

### RESUMEN

En esta publicación nosotros mostramos la importancia de la decisión de localización en el diseño de la cadena de suministro. Luego revisamos algunos modelos clásicos de localización como P-Center y P-Mediana además, revisamos dos modelos de localización que permiten incorporar otras decisiones de la cadena de suministro, como: Multi-product capacitated plant and warehouse location y warehouse location-routing. Para, por último, aplicar los modelos revisados en esta publicación a un caso en estudio.

**Palabras Claves:** cadena de suministro, modelos de localización, optimización.

### ABSTRACT

In this paper we show the importance of the facility location decisions in the supply chain design. Then we review some classical models of facility locations like P-Center and P-Mediana, also we review two models of facility locations what allow incorporate other supply chain decisions like: Multi-product capacitated plant and warehouse location and warehouse location-routing. For finally apply these review models in this paper to a case study.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad del Bío-Bío, Chile  
e-mail: raaraned@ubiobio.cl  
Teléfono: (56-41) 781837

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad del Bío-Bío, Chile  
e-mail: rmoraga@ubiobio.cl  
Teléfono: (56-41) 731701

## 1. INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro se compone de todas las partes involucradas, directa o indirectamente, en satisfacer las necesidades de los clientes (Chopra & Meindl, 2001). Donde las actividades relacionadas con la cadena de suministro se pueden clasificar en 4 áreas (Garrido, 2001):

1. Localización de recursos
2. Producción
3. Inventario
4. Transporte-distribución

Estas áreas de decisión son usadas en el diseño, planificación y operación de la cadena de suministro teniendo un alcance temporal y/o espacial en la organización.

Las decisiones de localización apuntan a instalar plantas de producción, centros de distribución, puntos de venta, etc. además, estas decisiones pueden llevar a determinar la asignación de clientes y la capacidad de las instalaciones que forman parte de la cadena de suministro.

Luego, las decisiones de localización pueden ser las decisiones más difíciles que se necesitan realizar para un eficiente diseño de la cadena de suministro (Daskin et al., 2003) esto debido a la naturaleza estratégica de esta decisión, lo que implica que es una decisión a largo plazo, además el decidir donde localizar, conlleva a considerar costos de instalaciones, los que pueden ser elevados en, por ejemplo, plantas de manufactura. Por todo lo anterior, se puede concluir que es una decisión poco flexible. Para mayor detalle sobre la importancia de la decisión de localización ver Daskin et al. (2003). Una buena o mala decisión de localización puede marcar la eficiencia de la cadena de suministro, afectando la satisfacción de las necesidades de los clientes, no olvidemos que las decisiones de localización investigan donde instalar un conjunto de instalaciones de modo de satisfacer las necesidades de un conjunto de clientes (Hale & Moberg, 2003), luego, una mala decisión de localización iría en menoscabo de este conjunto de clientes, contradiciendo la definición de cadena de suministro propuesta por Chopra & Meindl (2001).

En este artículo mostramos, por un lado, la importancia de las decisiones de localización en el diseño de la cadena de suministro y, por otro, presentamos algunos modelos de localización con diferentes matices, dando con esto a la empresa una herramienta más para la toma de decisiones. Por último, se aplicarán los modelos de localización presentados aquí a un caso práctico; los modelos son resueltos mediante el programa computacional LINGO 8.0.

## 2. MODELOS DE LOCALIZACIÓN

La localización de instalaciones investiga dónde ubicar físicamente un conjunto de facilidades, de modo de satisfacer las demandas de un grupo de clientes (Hale & Moberg, 2003), todo esto, sujeto a una serie de restricciones, para seleccionar un conjunto óptimo de facilidades para instalar en los sitios candidatos, de modo de optimizar alguna función objetivo. Se debe entender el término facilidad en su más amplio sentido, ya que puede incluir entidades como hospitales, industrias, colegios, puertos, etc.

Los modelos de localización son aplicados a casos específicos, esto es, su estructura (objetivos, restricciones y variables) depende de cada caso en estudio. Entonces, no existe un modelo genérico que sea apropiado para todos los problemas. Por lo que, modelos con distinto objetivo, pueden provocar diferentes soluciones para el mismo caso en estudio. Ya los autores Brandeau & Chiu (1989) revisaban 50 problemas de localización que habían sido estudiados, indicando como han sido formulados, su clasificación y como se relacionan unos con otros, dando a conocer una serie de objetivos para optimizar que pueden seguir los modelos.

Los modelos discretos de localización en redes se pueden clasificar de acuerdo con la distancia (Current et al., 2001). Ahora los modelos se pueden dividir en modelos que están basados en la máxima distancia y modelos basados en el distancia total o promedio. Presentaremos un modelo de cada tipo para su análisis:

**P-Centro:** el problema p-centro (Hakimi, 1964, 1965) pertenece a los modelos de máxima distancia. El objetivo de este modelo es minimizar la máxima distancia entre un nodo de demanda y su facilidad más cercana, dado que se tiene un número predeterminado de facilidades para instalar.

Conocido este modelo como problema mínimax y como un problema punto objetivo, ya que minimiza la distancia desde cada localización de demanda al sitio de la facilidad como un objetivo separado, por lo tanto, hay un objetivo para cada localización de demanda.

Existen varias posibles variaciones de este modelo. El problema “vértice p-centro” restringe el conjunto de ubicaciones candidatas de las facilidades en los nodos de la red, mientras que el problema “absoluto p-centro” permite la ubicación de las facilidades tanto en los nodos como en los arcos de la red. Estos modelos se pueden resolver asignando, o no, ponderaciones a los nodos de demanda. Si el problema es sin ponderación, todas las demandas de los nodos son tratadas iguales. Pero si asignamos ponderaciones a los nodos de demanda, la distancia entre un nodo de demanda y su facilidad es multiplicada por una ponderación, que es la demanda del nodo, por ejemplo, esta ponderación podría representar la importancia del nodo.

Para la formulación de este modelo de localización se siguió la formulación propuesta por (Current et al., 2001), la que se presenta a continuación:

- I = conjunto de los nodos de demanda i.
- J = conjunto de las localizaciones candidatas de las facilidades j.
- d<sub>ij</sub> = distancia entre la demanda nodo i y su facilidad candidata localizada en el sitio j.
- h<sub>i</sub> = demanda del nodo i.
- p = número de facilidades para localizar.

Definiendo las siguientes variables de decisión:  
 $x_j = 1$ , si se localiza en el sitio j; 0, en otro caso.  
 $y_{ij}$ , si la demanda del nodo i es asignada a la facilidad ubicada en el sitio j; 0, en otro caso.  
 $W$  = máxima distancia entre un nodo de demanda y su facilidad a la cual el nodo es asignada.

El p-centro puede ser formulado como sigue:

$$\text{Min } W \tag{1.1}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} x_j = p \tag{1.2}$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{1.3}$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{1.4}$$

$$W - \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \tag{1.5}$$

$$x_j \in \langle 0,1 \rangle \quad \forall j \in J \tag{1.6}$$

$$y_{ij} \in \langle 0,1 \rangle \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{1.7}$$

La función objetivo (1.1) minimiza la máxima demanda-distancia entre cada nodo de demanda y la facilidad seleccionada más cercana. La restricción (1.2) establece que existen p número de facilidades para ser localizadas. La restricción (1.3) requiere que cada nodo de demanda sea asignado exactamente a sólo una facilidad. La restricción (1.4) sólo permite que la demanda de un nodo sea asignada a una facilidad abierta, esto es una facilidad seleccionado. La restricción (1.5) estipula que la

máxima distancia entre el nodo  $i$  y la facilidad en el sitio  $j$ , denotado por  $W$  es más grande que la distancia entre cualquier nodo  $i$  y la facilidad localizada en el sitio  $j$ . El conjunto de restricciones (1.6) y (1.7) establece la naturaleza binaria de las variables de decisión.

**P-Mediana:** a diferencia del modelo anterior, el modelo p-mediana (Hakimi, 1964, 1965) encuentra la ubicación de  $p$  facilidades de modo de minimizar la demanda-distancia total entre los nodos de demanda y la facilidad a la cual son asignados, es por esto que este modelo pertenece a los modelos de distancia total o promedio. Al igual que para el modelo anterior, se sigue la formulación propuesta por (Current et al., 2001) la que se presenta a continuación:

$I$  = conjunto de los nodos de demanda  $i$ .

$J$  = conjunto de las localizaciones candidatas de las facilidades  $j$ .

$d_{ij}$  = distancia entre la demanda nodo  $i$  y su facilidad candidata localizada en el sitio  $j$ .

$h_i$  = demanda del nodo  $i$ .

$p$  = número de facilidades para localizar.

Definiendo las siguientes variables de decisión:

$x_j = 1$ , si se localiza en el sitio  $j$ ; 0, en otro caso.

$y_{ij} = 1$ , si la demanda del nodo  $i$  es asignada a la facilidad ubicada en el sitio  $j$ ; 0, en otro caso.

La formulación es la siguiente:

$$\text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (2.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.3)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2.4)$$

$$x_j \in \langle 0, 1 \rangle \quad \forall j \in J \quad (2.5)$$

$$y_{ij} \in \langle 0, 1 \rangle \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2.6)$$

La función objetivo (2.1) minimiza la demanda-distancia total entre los nodos de demanda y las facilidades seleccionadas. La restricción (2.2) significa que existen  $p$  facilidades para ser instaladas. La restricción (2.3) requiere que cada nodo de demanda sea asignado a sólo una facilidad. La restricción (2.4) sólo permite que la demanda de un nodo sea asignada a una facilidad abierta, esto es una facilidad seleccionado. El conjunto de restricciones (2.5) y (2.6) establece la naturaleza entera del modelo.

**Multi-product capacitated plant and warehouse location Model:** hasta aquí los modelos presentados consideran sólo un producto, además de no considerar la capacidad de la facilidad como una restricción al modelo y podríamos agregar que sólo consideran 2 niveles en la cadena de suministro, por ejemplo desde centros de distribución a clientes, desde plantas manufactureras a clientes, etc.

A continuación se presenta el modelo multi-product capacitated plant and warehouse location (Pirkul & Jayaraman, 1996). En este modelo los clientes demandan múltiples productos, estos productos son enviados desde los almacenes hacia los clientes, y a la vez los almacenes los reciben desde las plantas de manufactura. Se asume que la localización de los clientes es conocida, así como su demanda. También se conoce de antemano el número de plantas y almacenes por instalar. Por último, sólo un almacén puede cubrir las demandas de un cliente, pero un almacén puede tener varias plantas proveedoras.

El problema es localizar un conjunto de plantas y almacenes de un conjunto de sitios candidatos, además de solucionar la asignación de clientes a los almacenes y la asignación de almacenes a las plantas. El objetivo de este modelo es minimizar los costos fijos de establecer y operar plantas y almacenes, además de minimizar los costos de transporte desde las plantas hacia los almacenes y desde éstos hacia los clientes. Tanto las plantas como los almacenes poseen cierta capacidad.

Ahora se definen los datos de entrada y las variables de decisión:

**Datos de Entrada**

I: conjunto de clientes i

J: conjunto de localizaciones candidatas almacenes j

K: conjunto de localizaciones candidatas plantas k

L: conjunto de productos

$c_{ijl}$ : costo de transporte desde almacén j hasta cliente i, para el producto l.

$c_{jkl}$ : costo de transporte desde planta k hasta el almacén j, para producto l.

$f_k$ : costo fijo planta k

$f_j$ : costo fijo almacén j

$h_{il}$ : demanda producto l del cliente i

$V_j$ : máxima capacidad almacén

$D_k$ : máxima capacidad planta

$s_l$ : espacio ocupado producto l

W: número de almacenes por instalar

P: número de plantas por localizar

Variables de decisión

$y_{ijl}$ : 1, si la demanda cliente i es satisfecha por almacén j para el producto l; 0, en otro caso

$w_{jkl}$ : cantidad transportada desde planta k hasta almacén j para producto l.

$x_j$ : 1, si el almacén j es abierto; 0, en otro caso

$p_k$ : 1, si planta k es abierto; 0, en otro caso

Luego la formulación del modelo es la siguiente:

$$\text{Min } \sum_i \sum_j \sum_l h_{il} c_{ijl} y_{ijl} + \sum_j \sum_k \sum_l c_{jkl} w_{jkl} + \sum_k f_k p_k + \sum_j f_j x_j \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_j y_{ijl} = 1 \quad \forall i, l \quad (3.2)$$

$$\sum_i \sum_l h_{il} s_l y_{ijl} \leq V_j \quad \forall j \quad (3.3)$$

$$y_{ijl} \leq x_j \quad \forall i, j, l \quad (3.4)$$

$$\sum_j x_j = w \quad (3.5)$$

$$\sum_i h_{il} y_{ijl} = \sum_k w_{jkl} \quad \forall j, l \quad (3.6)$$

$$\sum_j \sum_l s_l w_{jkl} \leq D_k p_k \quad \forall k \quad (3.7)$$

$$\sum_k p_k = p \quad (3.8)$$

$$y_{ijl}, p_k, x_j \in \langle 0,1 \rangle \quad \forall i,j,l,k \quad (3.9)$$

$$w_{jkl} \geq 0 \quad \forall j,k,l \quad (3.10)$$

El primer término de la función objetivo (3.1) representa los costos de asignar la demanda de los clientes a los almacenes candidatos, el segundo término representa los costos de transporte desde las plantas hacia los almacenes, el tercer término representa los costos fijos de instalación y operación de sitios candidatos para las plantas y el cuarto término representa los costos fijos de instalación y operación de sitios candidatos para los almacenes. La restricción (3.2) asegura que sólo un almacén puede satisfacer la demanda de un cliente. La restricción (3.3) asegura que no se sobrepase la capacidad de los almacenes. La restricción (3.4) asegura que no se asigne la demanda de un cliente a un almacén, a menos que este almacén esté seleccionado (abierto). La restricción (3.5) indica el número de almacenes par instalar. La restricción (3.6) asegura continuidad de flujos entre plantas, almacenes y clientes, en otras palabras, toda la demanda del cliente  $i$  para el producto  $l$  disponible en el almacén  $j$  ha sido transportado desde las plantas. La restricción (3.7) representa la capacidad de la planta  $k$ . La restricción (3.8) indica el número de plantas por instalar. El conjunto de restricciones (3.9) indica la naturaleza binaria de esas variables de decisión. Y por último la restricción (3.10) asegura la condición de no negatividad para la variable de decisión que indica la cantidad transportada desde las plantas hacia los almacenes.

**Warehouse location-routing model:** el modelo Warehouse Location-Routing (Perl & Daskin, 1985) intenta dar respuesta a tres decisiones importantes en la cadena de suministro (Daskin et al., 2003):

1. Localización de almacenes
2. Asignación de clientes a los almacenes
3. Distribución de productos a los clientes (Ruteo de Vehículos)

En los modelos de localización presentados más arriba consideran entregas directas desde la facilidad hasta el cliente, en otras palabras, el costo de entrega es independiente de otras entregas hechas, lo que en la realidad puede llevar a una deficiente representación de la realidad a través de estos modelos. Dentro de las características del modelo Warehouse location-routing se encuentran que los costos de entrega a un cliente dependen de entregas hechas a otros clientes en la misma ruta y dependiendo también de la secuencia en que son visitados los clientes.

El separar las decisiones de localización y ruteo puede llevar a una decisión global no óptima, a pesar que las dos decisiones por separado lo sean. Para la formulación de este modelo se sigue la nomenclatura propuesta por (Daskin et al., 2003), donde además utiliza el término facilidad en vez de almacén. El objetivo de este modelo que considera sólo un tipo de producto, es minimizar la suma de:

1. Costos fijos de instalación de las facilidades
2. Costos de transporte entre los proveedores y las facilidades
3. Costo variable de producir en la facilidad  $j$
4. Costos de distribución a clientes.

La nomenclatura es la siguiente:

#### **Datos de Entrada**

$I$  = conjunto de nodos demanda.

$J$  = conjunto nodos oferta.

$P = I \cup J$ .

$\alpha_j$  = costo variable por unidad producida en el candidato  $j \in J$ .

$t_j$  = capacidad de la facilidad candidata.

$S$  = conjunto de proveedores.

$c_{sj}$  = costo transporte entre  $s \in S$  y  $j \in J$ .

$K$  = conjunto de vehículos.

$V_k$  = capacidad de vehículo  $k \in K$ .

$\phi_j$  = máxima distancia recorrida permitida en una ruta servida por el vehículo  $k \in K$ .

$\alpha_k$  = costo por unidad distancia para la entrega en la ruta  $k \in K$ .

### VARIABLES DE DECISIÓN

$z_{ijk} = 1$  si el vehículo  $k$  va directamente desde  $i \in P$ , hasta  $j \in P$ ; 0, en otro caso.

$w_{sj}$  = cantidad transportada desde un nodo proveedor  $s \in S$  hasta una facilidad candidata  $j \in J$ .

Luego la formulación queda de la siguiente manera:

$$\text{Min } \sum_{j \in J} f_j x_j + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} c_{sj} w_{sj} + \sum_{j \in J} a_j \sum_{i \in I} h_i y_{ij} + \sum_{k \in K} \alpha_k \sum_{j \in P} \sum_{i \in P} d_{ij} z_{ijk}$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in P} z_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.1)$$

$$\sum_{i \in I} h_i \sum_{j \in P} z_{ijk} \leq V_k \quad \forall k \in K \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{i \in P} d_{ij} z_{ijk} \leq \mathfrak{S}_k \quad \forall k \in K \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} z_{ijk} \geq 1 \quad \forall \text{ subconjunto } V \subset P \text{ tal que } J \subset V \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in P} z_{ijk} - \sum_{j \in P} z_{jik} = 0 \quad \forall i \in P, \forall k \in K \quad (4.5)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{i \in I} z_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (4.6)$$

$$\sum_{s \in S} w_{sj} - \sum_{i \in I} h_i y_{ij} = 0 \quad \forall j \in J \quad (4.7)$$

$$\sum_{s \in S} w_{sj} - t_j x_j \leq 0 \quad \forall j \in J \quad (4.8)$$

$$\sum_{m \in P} z_{imk} + \sum_{h \in P} z_{jhk} - y_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (4.9)$$

$$x_j \in \langle 0,1 \rangle \quad \forall j \in J \quad (4.10)$$

$$y_{ij} \in \langle 0,1 \rangle \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4.11)$$

$$z_{ijk} \in \langle 0,1 \rangle \quad \forall i, j \in P, \forall k \in K \quad (4.12)$$

$$w_{sj} \geq 0 \quad \forall s \in S, \forall j \in J \quad (4.13)$$

La restricción (4.1) requiere que cada cliente pertenezca a sólo una ruta. La restricción (4.2) asegura que no se viole la capacidad de los vehículos. La restricción (4.3) determina una distancia máxima para cada ruta. La restricción (4.4) requiere que al menos una ruta vaya desde un conjunto  $V$  (apropiado subconjunto de puntos  $P$  que contienen el conjunto de sitios candidatos para instalar facilidades) hasta su complemento, en otras palabras, generar rutas que sólo visiten clientes. La restricción (4.5) asegura que si una ruta entra en el nodo  $i \in P$  también pueda salir del mismo nodo. La restricción (4.6) asegura que una ruta sólo pueda operar con una facilidad. La restricción (4.7) asegura que la cantidad de flujo enviado desde las plantas hasta las facilidades es igual al flujo enviado desde las facilidades hacia los clientes. La restricción (4.8) asegura que no se viole la capacidad de la facilidad, además de no asignar una facilidad a una planta a menos que esta facilidad esté seleccionada (abierta). La restricción (4.9) permite que si una ruta  $k \in K$  parte desde el nodo cliente  $i \in I$  y también parte de la facilidad  $j \in J$ , entonces la demanda del cliente  $i \in I$  puede ser asignada a la facilidad  $j \in J$ . Esta restricción permite unir las variables  $y_{ij}$  y  $z_{ijk}$ . El conjunto de restricciones (4.10), (4.11), (4.12) y (4.13) aseguran integridad y no negatividad.

## Caso en Estudio

Lo que se intenta es centralizar o externalizar el servicio de preparación y mantención de elementos de corte (sierras huinchas y sierras circulares) para un conjunto de plantas. Donde para una buena operación de aserrío es indispensable efectuar una adecuada y planificada mantención de las herramientas de corte. La preparación y mantención de los elementos de corte en la industria de aserrío y elaboración es de gran importancia por la incidencia que estas operaciones tienen en la producción, vida útil de las herramientas, calidad del corte, terminación de la superficie y cantidad de desechos producidos (Vidaurre et al., 1989).

Se podría decir que en estos momentos cada planta posee su propio taller de mantención, donde las demandas diarias de las plantas incluidas en el trabajo se muestran a continuación.

**Tabla N°1: Demandas diarias de elementos de corte**

Plantas	Sierras Huinchas	Sierras Circulares	Total
Planta 1	32	62	94
Planta 2	60	244	304
Planta 3	24	60	84
Planta 4	4	76	80
Planta 5	32	100	132
Planta 6	48	124	172
Planta 7	32	100	132
Planta 8	20	16	36
TOTAL	252	782	1034

Los costos de transporte (independientes de la cantidad transportada) entre las distintas plantas incluidas en el estudio se muestran a continuación:

**Tabla N°2: Costos de Transporte entre plantas**

Costos Transportes(\$)	Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 7	Planta 8
<b>Planta 1</b>		33824	112021	268849	33824	255402	238634	97500
<b>Planta 2</b>	33824	0	78197	235025	0	221578	190762	131324
<b>Planta 3</b>	112021	78197		156828	78197	143381	126613	209521
<b>Planta 4</b>	268849	235025	156828	0	235025	156828	63800	366349
<b>Planta 5</b>	33824	0	78197	235025	0	221578	190762	131324
<b>Planta 6</b>	255402	221578	143381	156828	221578	0	72730	352902
<b>Planta 7</b>	238634	190762	126613	63800	190762	72730	0	336134
<b>Planta 8</b>	97500	131324	209521	366349	131324	352902	336134	0

El llegar a determinar el sitio óptimo para la instalación del taller se realizó asumiendo algunas consideraciones como:

- 1.- Las localizaciones candidatas para el taller son 8 y 7 son las actuales localizaciones de las plantas, luego el taller debe quedar ubicado en una de estas 8 ubicaciones candidatas, razón por la cual se utilizan modelos de localización discretos.
- 2.- Se asume que este taller centralizado de mantención es capaz de satisfacer este servicio a todas las plantas incluidas en el estudio.
- 3.- Los costos fijos de instalación del taller son iguales en todos los sitios candidatos.
- 4.- Sólo se puede instalar un taller.
- 5.- El costo de mantención de un elemento de corte es igual en todas la localizaciones candidatas.



## Aplicación de los modelos de localización a caso en estudio

Ya habiendo hecho una revisión de algunos modelos de localización, se procede a alimentar los modelos con los datos de entrada presentados en las tablas N° 1 y 2, que representan respectivamente demandas y costos de transportes. Los resultados de cada modelo son:

**P-Centro:** de acuerdo con este modelo la ubicación óptima para el taller centralizado de mantención de elementos de corte es en la Planta 3 con una función objetivo de 12972 [unidades\*Km].

**P-Mediana:** el sitio óptimo para localizar el taller de acuerdo con este modelo es Planta 2. Con una función objetivo de 48079170 [unidades\*\$].

**Multi-product capacitated plant and warehouse location model:** los dos modelos anteriores consideran sólo producto único, a diferencia de este modelo, que permite definir múltiples productos, para nuestro caso, sierras huinchas y sierras circulares. Para lo cual se utilizan las siguientes dimensiones promedios de los elementos de corte.

**Tabla N°3: Dimensiones promedios de elementos de corte**

Tipo de Elemento	Volumen(m3)	Peso(Kg.)
Sierra Huincha	0,48	25
Sierra Circular	0,0026	5

En primer lugar se analizó la posibilidad de instalar un taller y un almacén. El modelo entregó como resultado que tanto la ubicación del taller como la del almacén sea la misma y esta localización es Planta 2 con una función objetivo de  $16511 \cdot 10^6$  \$. Este se explica debido a que los costos de transporte son los mismos desde el taller al almacén y desde el almacén a las plantas (clientes), además, localizar el taller y el almacén en el mismo lugar provoca un ahorro en los costo de transporte entre el taller y el almacén.

Ahora, si se desea instalar un taller y dos almacenes el modelo entrega la siguiente solución: localizar el taller y un almacén en Planta 2, y el segundo almacén en Planta 1 con una función objetivo de  $16516 \cdot 10^6$  \$, este aumento en la función objetivo se debe al costo de crear un segundo almacén; además, este nuevo almacén sólo cubriría la demanda de la planta ubicada allí.

**Warehouse location-routing model:** para aplicar este modelo al caso en estudio, éste debió sufrir algunas modificaciones. En primer lugar se cambio el cuarto término de la función objetivo

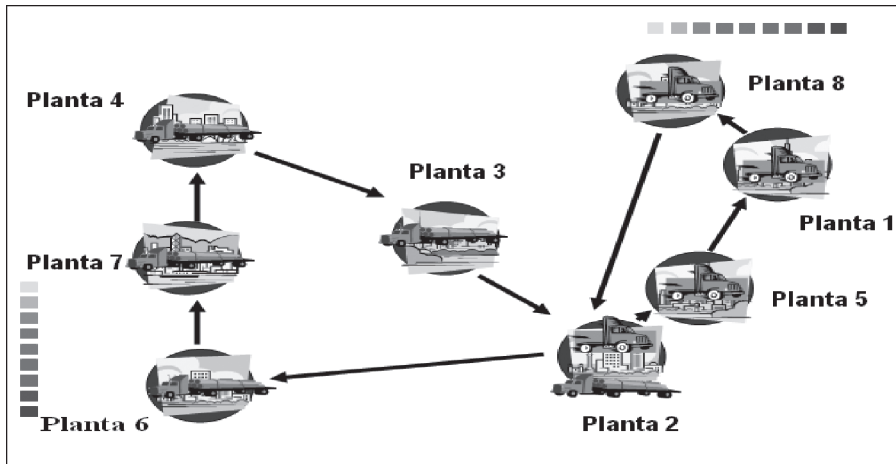
$\sum_{k \in K} \alpha_k \sum_{j \in P} \sum_{i \in P} d_{ij} z_{ijk}$  por  $\sum_{j \in P} \sum_{i \in P} c_{ij} z_{ijk}$ , este cambio se debe a que en el modelo original los costos de transporte desde el taller a los clientes depende directamente de la distancia recorrida, lo que es poco realista en este caso en estudio. Este nuevo costo de transporte  $c_{ij}$ , es un costo independiente de la

carga transportada, es un costo de arriendo del camión. Y por último agregamos la restricción,  $\sum_{j \in J} x_j = p$ ,

que asegura la cantidad de talleres-almacenes por instalar, para este caso en estudio es 1. Una vez hechas todas estas modificaciones la solución entregada por el modelo es localizar el taller y almacén en Planta 2 y establecer dos rutas para la distribución y recolección de los elementos de corte, la descarga y carga de elementos de corte es simultánea. Las rutas entregadas por el modelo son:

**Ruta 1:** Planta 2->Planta 5->Planta 1->Planta 8->Planta 2.

**Ruta 2:** Horcones I->Planta 6->Planta 7->Planta 4->Planta 3->Planta 2.



**Figura 1:** Ruteo de vehículos

A modo de resumen se presenta la siguiente tabla N° 4.

**Tabla N°4: Resumen de modelos aplicados al caso en estudio**

Modelo	Decisión
P-Centro	Planta 3
P-Mediana	Planta 2
Multi-product capacitated plant and warehouse	Planta 2
Warehouse Location-Routing	Planta 2

### 3. CONCLUSIONES

Las decisiones de localización constituyen una de las decisiones más importantes en el diseño de la cadena de suministro. Esta importancia se debe en otras cosas a la naturaleza estratégica de esta decisión, además de ir asociada, por lo general, a costos elevados de instalación. Una mala decisión puede afectar la eficiencia de la organización, así como también el nivel de servicio a los clientes.

Los modelos de localización son una herramienta más de la investigación de operaciones que se pueden aplicar en la toma de decisiones de las organizaciones. Existe una gran variedad de modelos de localización como los analizados en este trabajo. Los modelos de localización pueden ir variando de acuerdo con el caso práctico en el que son aplicados, entonces no existe un modelo genérico para los problemas prácticos.

Los modelos mostrados aquí varían el uno del otro, ya que si bien todos determinan la ubicación óptima de una facilidad de un conjunto de sitios candidatos, lo hacen optimizando funciones objetivos distintas. Es así como el modelo p-centro optimiza cada par posible de cliente y facilidad por separado, ya que como se definió en este trabajo: "minimiza la máxima distancia". El modelo P-Mediana optimiza una función objetivo de toda la red (clientes y facilidades), esto puede ser visto como una búsqueda de eficiencia.

A diferencia de los modelos P-Centro y P-Mediana, el modelo Multi-product capacitated plant and warehouse location permite la unión de 3 estados de la cadena de suministros y trabajar con múltiples productos. El modelo Warehouse location-routing logra integrar las decisiones de localización y ruteo de vehículos, lo que permite reflejar más fielmente la realidad.

De acuerdo con el caso en estudio expuesto en este trabajo podemos concluir que el modelo que mejor se ajusta es Warehouse location-routing, ya que sería poco realista considerar viajes directos desde el taller a cada planta (clientes), más bien se deberían crear rutas para atender a las plantas, de modo de ser más eficientes.

El modelo p-centro entregó como resultado el sector Planta 3 como el sitio óptimo para la instalación del taller y que es un lugar bastante céntrico con respecto a las demás plantas incluidas en el trabajo y, además, los costos de transporte, considerando el taller en Planta 3, no difieren mayormente con respecto a la localización del taller en Planta 2, pero presenta un problema desde el punto de movimientos de elementos de corte, y es que la planta localizada allí consume una pequeña fracción del servicio de mantención total. Si el taller se localiza en Planta 3 debe satisfacer todas las plantas, incluyendo Planta 2, que es una planta con gran demanda de elementos de corte, lo que se traduce en camiones más grandes y aumento del tiempo de servicio de planta, mientras si el taller se localiza en Planta 2, debe satisfacer todas las plantas, incluyendo Planta 3, que tiene una pequeña demanda y por consiguiente un menor tiempo de servicio en planta, por tiempo de servicio en planta se entiende el tiempo en descargar y cargar los elementos de corte. Para un mejor análisis recomendamos la aplicación del modelo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo propuesto por Koskosidis & Powell (1990).

Para este caso en estudio no se justifica la instalación de un almacén de transferencia de elementos de corte, esto se demuestra utilizando el modelo Multi-product capacitated plant and warehouse. Por lo tanto, crear un segundo almacén no disminuye el costo total, lo que no justifica la instalación de un segundo almacén.

#### **4. BIBLIOGRAFÍA**

1. Brandeau, M., & Chiu, S. (1989). An Overview of Representative Problems in Location Research. *Management Science*, 35(6), 645-674.
2. Chopra, S., & Meindl, P. (2001). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. 2ª Edition. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
3. Current, J., Daskin, M., & Schilling, D. (2001). Discrete Network Location Models. In: *Facility Location Theory: Applications and Methods*, pp. 85-112. Berlin: Z. Drezner and H. Hamacher Eds.
4. Daskin, M., Snyder, L., & Berger, R. (2003). *Facility Location in Supply Chain Design*. Working paper, No. 03-010. Northwestern University.
5. Garrido, R. (2001). *Modelación de Sistemas de Distribución de Carga*. Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile.
6. Hale, T., & Moberg, Ch. (2003). Location science research: A review. *Annals of Operations Research*, 123(1), 21-35.
7. Hakimi, S. (1964). Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12, 450-459.
8. Hakimi, S. (1965). Optimum location of switching centers in a communications network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, 13, 462-475.
9. Koskosidis, Y., & Powell, W. (1990). Application of Optimization Based Models on Vehicle Routing. *Journal of Business Logistics*, 11(2), 101-128.
10. Perl, J., & Daskin, M. (1985). A Warehouse Location-Routing Problem. *Transportation Research*, 19B(5), 381-396.
11. Pirkul, H., & Jayaraman, V. (1996). Production, Transportation, and Distribution Planning in a Multi-Commodity Tri-Echelon System. *Transportation Science*, 30(4), 291-302.
12. Vidaurre, S., Melo, & R., Pavon, M. (1989). *Principios de organización y operación del aserradero*. Concepción: Instituto Forestal.

Copyright of Revista Ingenierí;a Industrial is the property of Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad del Bio-Bio and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.