

ANÁLISIS DE MODELOS DE LOCALIZACIÓN PARA APOYAR LA DISTRIBUCIÓN DE BINS EN HUERTOS DE MANZANAS

Marcela C. González-Araya

Departamento de Modelación y Gestión Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca,
Merced 437, Curicó, Chile
mgonzalez@utalca.cl

Carolina Urzúa Bobadilla

Centro de Estudios de Alimentos Procesados-CEAP,
Av. San Miguel N° 3425, Talca, Chile
curzua@ceap.cl

Luis G. Acosta Espejo

Departamento de Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María
Av. Santa María 6400, Vitacura, Santiago, Chile
luis.acosta@usm.cl

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis de modelos de localización (modelos de p-medianas capacitado y p-centros capacitado), para proponer un plan de distribución de bins en huertos de manzanas, orientado a disminuir las distancias recorridas por los trabajadores de temporada en la recolección de fruta y mejorar la gestión de los huertos. Para el análisis de los modelos se usaron los datos de un huerto exportador de manzana fresca de la Región del Maule, Chile, y se compararon los resultados obtenidos considerando el tiempo de solución de cada modelo, el número de restricciones y la aplicabilidad de la distribución de bins entregada. Fue usado un método multicriterio para seleccionar el modelo más adecuado para establecer la distribución de bins, siendo seleccionado el modelo de las p-medianas capacitado. Al aplicar este modelo se obtuvo un aumento promedio en los rendimientos de los trabajadores de temporada de aproximadamente un 17,21%.

PALABRAS CLAVE. Modelos de Localización de Instalaciones. Problema de las p-medianas capacitado. Programación Lineal Entera.

AG&MA - PO na agricultura e Meio Ambiente, OC - Otimização Combinatória

ABSTRACT

In this work a location models analysis (Capacitated p-median problem and Capacitated p-center problem) for planning bins distribution in apple orchards, aiming to reduce distances walked by the workers during fruits harvesting season is carried out. In this analysis the data were collected from an apple orchard located in Maule Region, Chile. The results of each model were compared considering solution time, the number of constraints and the applicability of the obtained solution for bins distribution. A multicriteria decision support method was used to select the more suitable location model for bins distribution, being chosen the Capacitated p-median problem. When was applied this model, an increase in season harvesters yields of approximately 17.21% was obtained.

KEYWORDS. Facility location models. Capacitated p-Median problem. Integer Linear Programming.

AG&MA – OR in Agriculture and Environment, OC – Combinatory Optimization

1. Introducción

La Región del Maule es la segunda zona exportadora de fruta fresca más importante de Chile, con un 20% del total de frutos enviados al exterior, precedida por la Región de O'Higgins, la cual exporta el 30% de la producción global de fruta del país. Según datos de ODEPA (2008), el volumen de exportación de fruta fresca se ha incrementado en un 18,57% (comparación temporadas 2008-2009 y 2009-2010 entre los meses enero a diciembre). La actividad agrícola reciente representa aproximadamente el 4,4% del Producto Interno Bruto (PIB) del país, participando del 4,8 % del total de las exportaciones, empleando para ello casi el 15 % de la población (Henríquez, 2010). Actualmente, a pesar de la situación financiera mundial, la oferta alimentaria chilena sigue ocupando un importante lugar en el mercado mundial, gracias al aumento de los tratados de libre comercio establecidos.

Estas proyecciones demandan, a su vez, un mayor nivel de exigencias a las empresas por alcanzar nuevos mercados. Estas exigencias están principalmente asociadas a mejorar y a garantizar la calidad requerida del producto, aumentando la complejidad de la cadena de suministro de la fruta fresca. Sin embargo, en la industria frutícola chilena, la mayor parte de la planificación de los procesos, requerimientos de insumos y materiales continúa siendo hecha de forma tradicional, es decir, basada netamente en la experiencia de sus participantes, existiendo pocos casos donde, para elaborar una estrategia enfocada a la eficiencia del proceso, se usen modelos de optimización.

Este trabajo se enfoca en mejorar las actividades de cosecha de manzana, buscando, mediante el análisis de modelos de localización, proponer la mejor manera de distribuir los bins (recipientes con capacidad de 350 kilogramos aproximadamente) en los huertos y, así, mejorar la gestión. Con este propósito, se analizan las soluciones de distribución de bins usando diferentes modelos de localización, que buscan disminuir las distancias recorridas por los trabajadores de temporada en la recolección de la fruta. Con las soluciones de los modelos analizados, se establece cual de estos entrega propuestas más razonables para las operaciones de distribución y recolección de bins, de manera que los cosecheros recorran menores distancias y sean consideradas, además, las características de las variedades de fruta en los cuarteles, así como la geografía particular de éstos.

En un trabajo anterior (González-Araya *et al.*, 2009), iniciado por Ferreira (2006), se propuso mejoras en la distribución de los bins en los huertos utilizando un modelo de p-medianas capacitado. Sin embargo, en este trabajo no se consideran algunas características particulares de las variedades de manzanas plantadas en los cuarteles, como por ejemplo, la presencia de árboles polinizantes que, en algunas variedades, no se cosechan. Además, si bien en la propuesta de los autores se minimiza la suma de las distancias recorridas por los cosecheros, es posible que la distancia que recorre cada cosechero no sea homogénea, es decir, pueden existir cosecheros que recorran largas distancias, mientras que otros recorran cortas distancias. Por esta razón, en este trabajo se analizan las soluciones entregadas por dos tipos de modelos de localización, con el fin de evaluar cual de éstas es más adecuada para la planificación de las actividades del huerto.

Para el análisis se utilizan los datos de un huerto de la Región del Maule, Chile, el cual tiene una superficie de 62,6 hectáreas plantadas con diversas variedades de manzanos, tales como: Royal Gala, Granny Smith, Scarlet, Early Red One, Fuji y Pink Lady. Sin embargo, las variedades más representativas del huerto corresponden a Royal Gala, Granny Smith y Early Red One, presentes en los cuarteles M4, M8 y M13, respectivamente. Por lo tanto, el análisis de esta investigación se enfocará en estos cuarteles, tomando en cuenta los respectivos procesos de maduración de las variedades, la geografía de los cuarteles y las estimaciones obtenidas con los datos de cosecha de dos temporadas previas.

Cabe resaltar que los administradores de huertos presentan gran interés en encontrar una alternativa confiable que les permita planificar y tomar decisiones a corto plazo al momento de llevar a cabo la cosecha de la fruta.

A continuación se describen los modelos de localización usados para establecer cual de éstos es más adecuado para planificar la distribución de bins. En la sección 3 se describe brevemente el análisis multicriterio realizado para seleccionar el modelo de localización más

adecuado usando Teoría de Utilidad Multiatributo. Los principales resultados obtenidos al aplicar el modelo seleccionado (p -medianas capacitado) son presentados en la sección 4. Finalmente, las principales conclusiones son mencionadas en la sección 5.

2. Modelos de Localización Usados para Analizar la Distribución de Bins en Huertos

En este trabajo se analizaron los resultados obtenidos por tres modelos de localización de instalaciones, siendo éstos el modelo de p -medianas capacitado clásico (Ferreira, 2006, González-Araya *et al.*, 2009), el modelo de p -medianas capacitado (Garey y Johnson, 1979; Osman y Christofides, 1994) y el modelo de los p -centros capacitado (Kariv y Hakimi, 1979).

Es interesante destacar que en el área de la agricultura no se han realizado muchas aplicaciones de modelos de localización (Lucas y Chhajer, 2004; Higgins y Laredo, 2006, González-Araya *et al.*, 2009), indicando que en esta área aún existe una brecha entre la teoría y la práctica.

A continuación se presenta la formulación de los problemas de p -medianas capacitado y p -centros capacitado.

2.1. Problema de p -medianas Capacitado

En términos generales, el problema en estudio consiste en determinar el lugar donde se localizarán los bins durante el proceso de cosecha y en asignar los manzanos a cada bins localizado. Este proceso se debe realizar buscando minimizar la distancia recorrida por los trabajadores durante la cosecha (y de esta manera disminuir el tiempo total de traslado de los mismos). Este tipo de problema puede ser modelado como un problema de las p -medianas capacitado.

El problema de las p -medianas capacitado consiste en localizar p instalaciones (medianas) en una red, minimizando la suma de todos los costos o distancias desde un punto de demanda a la instalación más cercana, respetando su capacidad máxima (Garey y Johnson, 1979; Osman y Christofides, 1994). De este modo, las instalaciones o medianas corresponden a los bins y las áreas de demanda corresponden a los manzanos a cosechar.

En la formulación del modelo de las p -medianas capacitado se consideran los siguientes parámetros (González-Araya *et al.*, 2009):

- *Localizaciones potenciales de los bins:* Sea $N = \{1, \dots, n\}$ el conjunto de potenciales localizaciones de bins dentro del huerto, las cuales pueden o no ser efectivamente seleccionadas.
- *Número de manzanos en el huerto:* Sea $M = \{1, \dots, m\}$ el conjunto de manzanos dentro del huerto, los cuales deberán ser asignados a una de las localizaciones seleccionadas para colocar un bins.
- *Distancia:* Sea d_{ij} la distancia lineal (en metros) entre el manzano i , $i \in M$, y la localización del bins j , $j \in N$.
- *Número de bins a localizar:* Sea p la cantidad de bins necesaria en el huerto para depositar las manzanas cosechadas de una dada variedad.
- *Capacidad de bins:* Sea k el número máximo de manzanos que puede ser asignado a un bins, por lo tanto, la unidad de medida es árboles/bins.

Las variables de decisión del modelo se definen de la siguiente forma:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{si un bins es localizado en el lugar } j, j \in N \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el manzano } i, i \in M, \text{ es asignado al bins localizado en } j, j \in N \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

De esta forma, la formulación del modelo de las p -medianas capacitado es la siguiente:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i \in M, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq ky_j, \quad j \in N, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = p, \quad (4)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \quad j \in N, \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in M, j \in N. \quad (6)$$

La función objetivo (1) busca minimizar la suma de las distancias recorridas por los cosecheros desde cada manzano hasta uno de los bins. El conjunto de restricciones (2) garantiza que cada manzano sea asignado a un único bins, mientras que el conjunto de restricciones (3) asegura que a un bins localizado en j a lo más se le puede asignar k manzanos. La restricción (4) establece que deben ser localizados p bins. Finalmente, las restricciones (5) y (6), definen la naturaleza binaria del modelo.

Para la formulación del modelo de p -medanas no capacitado sólo debe omitirse el conjunto de restricciones (3), que establecen la capacidad máxima de cada bins. Los demás parámetros, variables y restricciones tienen la misma definición que para el modelo de p -medanas capacitado.

2.2. Problema de p -Centros Capacitado

De manera general, el objetivo del problema de los p -centros consiste en localizar un número determinado de instalaciones (p), buscando minimizar la distancia máxima a la que se encuentra un usuario de la instalación más próxima. El modelo de los p -centros es aplicado cuando es necesario asegurar la equidad entre los usuarios atendidos dentro de una gran área geográfica (Ghiani *et al.*, 2004).

En el caso analizado, la formulación matemática debe incorporar, al igual que el problema de p -medanas, la capacidad de las instalaciones. A continuación, se detalla la formulación matemática clásica para el problema de los p -centros capacitado (Albareda-Sambola *et al.*, 2006).

Tanto los parámetros, como las variables de decisión del modelo tienen la misma definición que en el modelo de p -medanas capacitado. Sin embargo, en el modelo de p -centros capacitado se agrega una variable de decisión más, denotada por W . De esta forma, sea W la distancia máxima entre un manzano y la localización del bins al cual es asignado.

La formulación matemática para el problema de p -centros capacitado es la siguiente:

$$\text{Minimizar } z = W, \quad (7)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i \in M, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq ky_j, \quad j \in N, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = p, \quad (4)$$

$$W \geq \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}, \quad i \in M, \quad (8)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \quad j \in N, \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in M, j \in N. \quad (6)$$

La función objetivo (7) junto con la restricción (8) genera un problema *min-max*, donde se busca minimizar la máxima distancia que recorren los cosecheros desde un manzano hasta la localización del bins más cercano. Las demás restricciones del modelo cumplen la misma función que la descrita en el modelo de *p*-medianas capacitado.

La estimación de los parámetros usados en cada uno de los modelos, según la variedad de manzana analizada, se describe a continuación.

Estimación de los parámetros usados en los Modelos

El cálculo de la distancia d_{ij} entre el manzano i y localización del bin j , para una superficie de plantación perteneciente a un determinado cuartel, es hecho mediante un programa computacional. En este programa se consideran las densidades de plantación del cuartel respectivo, la distribución de árboles polinizantes y la cantidad de árboles por hilera de la superficie elegida. Con esta información se establecen las potenciales localizaciones de bins (total de elementos definidos en el conjunto N) y, a seguir, se calcula la distancia lineal entre el manzano i y la potencial localización del bins j .

El parámetro p denota el número de bins a localizar en una superficie determinada, los cuales son necesarios para depositar las manzanas cosechadas. Su valor se determina de acuerdo a la cantidad de manzanas estimadas a cosechar en la superficie definida para el modelo. Cabe destacar que para la estimación de este parámetro se ha considerado un margen de seguridad de 10%, con el fin evitar desabastecimiento de bins en el huerto al momento de la cosecha. La fórmula para determinar este parámetro se explica a continuación.

Sean:

PN_s : Producción neta estimada en kilogramos para una superficie determinada.

TA_s : Total de árboles plantados de la variedad a cosechar en un respectivo sector.

Pf : Porcentaje de cosecha lista para recolectar.

C_b : Capacidad del bin seleccionado para la cosecha, medida en kilogramos.

n : Número de localizaciones potenciales para los bins,

$$p = \frac{PN_s}{TA_s} \times \frac{n}{C_b} \times Pf$$

Por lo tanto, se determina el número de bins a localizar en un cuartel en función del porcentaje de fruta madura a ser cosechada, a la productividad de los manzanos, del total de árboles plantados y a la capacidad del bins.

El parámetro k indica la capacidad de árboles factibles de asignar a un bins en la cosecha de una determinada variedad. Este parámetro refleja la cantidad de manzanas de una determinada variedad que un bins es capaz de contener. La unidad de medida es árboles/bin, es decir, cantidad total de manzanos que pueden ser asignados a la ubicación del bins respectivo, este parámetro corresponde al cuociente entre la cantidad de elementos definidos en el conjunto N (especificado en la sección 2.1) y el parámetro p . En caso de que el cuociente sea decimal, éste se aproxima a su valor entero siguiente, pues debe ser un valor entero. La fórmula para estimar el parámetro k es la siguiente:

$$k = \left\lceil \frac{n}{p} \right\rceil + 1$$

3. Análisis Multicriterio

Luego de haber formulado los modelos capacitados de *p*-medianas y *p*-centros, ambos orientados al problema de localización de bins, considerando además la formulación realizada

por Ferreira (2006), se aplica la Teoría de Utilidad Multiatributo - MAUT (Autran *et al.*, 2004) para establecer cual de los modelos es más apropiado de implementar, con el fin de mejorar la gestión de huertos.

Los tomadores de decisión en el análisis sobre cual modelo utilizar para minimizar la distancias recorridas por los trabajadores de temporada en su labor de cosecha, son el administrador del huerto en estudio y el analista de esta aplicación.

Las alternativas evaluadas son tres, correspondientes a los modelos descritos en la sección 2, es decir:

- Alternativa (A): Modelo de las p -medianas capacitado clásico
- Alternativa (B): Modelo de las p -medianas capacitado
- Alternativa (C): Modelo de los p -centros capacitado

En cuanto a la definición de criterios para medir el desempeño de las alternativas, se consideran dos criterios computacionales, siendo éstos *el tiempo de solución* y *el número de restricciones*, y un criterio denominado *distribución espacial de bins* seleccionados, para evaluar la viabilidad de la localización sugerida en relación a las condiciones reales del cuartel analizado.

El procedimiento y las ventajas de MAUT para la toma de decisiones son descritos en el trabajo de Jorquera (2006), quien elabora un sistema de evaluación para seleccionar subcontratistas en una empresa constructora.

Este trabajo, además de proponer la localización de bins para las variedades predominantes, también lo hace para las variedades polinizantes, que en el caso de estudio corresponden al 11% de la plantación de manzanos. En vista de ello, se aplica MAUT a dos superficies representativas de ambos casos, con el propósito de determinar la mejor localización de bins para ambos tipos de plantaciones. Por lo tanto, se evalúan los criterios en base a los resultados de las tres alternativas para ambos tipos de plantaciones.

Al aplicar MAUT, el modelo matemático seleccionado en ambos tipos de plantaciones, fue el modelo de p -medianas capacitado, el cual obtuvo la mayor ponderación (Alternativa B en la Tabla 1). En cuanto al modelo de p -centros capacitado, su ponderación fue cero, ya que, en la etapa de evaluación de las alternativas, su desempeño en cada criterio fue inferior a las otras alternativas (Alternativa C en la Tabla 1). Por ejemplo, en relación a la distribución espacial de bins, el modelo de los p -centros capacitado entregó soluciones que no facilitaban la localización y recolección de éstos con la maquinaria. De esta forma, el 80% la propuesta con este modelo fue muy inferior a la de los otros modelos.

TABLA 1: ETAPA 6 DEL LA APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE UTILIDAD MULTIATRIBUTO, CORRESPONDIENTE A LA EVALUACIÓN GLOBAL DE CADA ALTERNATIVA PARA EL CASO DE LA VARIEDAD PREDOMINANTE

Criterio	Peso	A	B	C
Distribución espacial de bins	53	4.770	5.300	0
Tiempos de solución	31	3.038	3.100	0
Número de restricciones	16	16	1.600	0
Beneficios agregados		7.824	10.000	0

Se realizó un análisis de sensibilidad, con el fin conocer los potenciales cambios de los resultados obtenidos. Luego de estudiar diversos escenarios posibles, se comprobó la robustez del modelo seleccionado.

Si bien, existe una diferencia menor en los valores de los criterios correspondientes a las alternativas A y B, predomina esta última por ser más robusta.

4. Aplicación del Modelo del Modelo de p - Medianas Capacitado

Definido el modelo matemático de localización de bins (p -medianas capacitado), el cual se adapta mayoritariamente a las condiciones de plantación de las variedades de manzanas disponibles en el huerto en estudio (tanto para variedades predominantes, como polinizantes), se

crea un sistema de apoyo a la localización de bins mediante la plataforma de programación de NetBeans IDE (versión: 6.7.1). Esta herramienta se aboca al levantamiento de información relevante para la generación de los distintos parámetros de entrada al modelo, a través de la selección e incorporación de antecedentes por medio de una interfaz principal y dos secundarias. Esta herramienta permite formular y correr el problema usando el software de optimización ILOG OPL Development Studio IDE (versión: 6.0.1), el que utiliza como motor de optimización a CPLEX (versión 12.0). Finalmente, NetBeans crea un archivo Excel en donde se transfieren las soluciones para cada sector y su correspondiente matriz de distancias. Posteriormente, se interpretan estas soluciones mediante Macros de Excel, las que fueron programadas en el lenguaje de programación Visual Basic.

Por lo tanto, el diseño de esta herramienta consta de tres etapas, las que corresponden a:

- **Etapla 1:** Definición de antecedentes necesarios para la generación de parámetros.
- **Etapla 2:** Cálculo de rangos y parámetros de entrada al modelo.
- **Etapla 3:** Interpretación de las soluciones.

La herramienta diseñada fue aplicada a las variedades de manzanas más representativas del huerto en estudio: Early Red One (cuartel M13), Royal Gala (cuartel M4) y Granny Smith (cuartel M8), obteniéndose para cada uno de estos tres cuarteles, un plan de cosecha que indica dónde se deben localizar los bins (entre qué hileras, respectivamente) y a qué distancia métrica y práctica (número de árboles entre cada bins), teniendo en cuenta sus respectivas modalidades de cosecha.

La modelación realizada para las distintas variedades se basa en la producción de la temporada anterior (2009-2010).

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos para las variedades Early Red One y Royal Gala.

4.1 Resultados de la Aplicación del Modelo de p-Medias Capacitado a los Datos del Cuartel M13, Variedad Early Red One

Considerando los 259.321 kg. netos cosechados en la anterior temporada, un peso promedio del bin de 379 kg. y la modalidad de cosecha correspondiente a barrido (100% de cosecha), se estima el plan de cosecha y la distancia promedio a recorrer por los trabajadores de temporada para esta variedad.

4.1.2. Plan de Localización de Bins en el Cuartel M13, Variedad Early Red One

La distancia promedio que recorrería el personal de cosecha, según la resolución del modelo, desde los manzanos asignados al bin seleccionado en cada sector del cuartel en análisis, es de 2,94 metros, aproximadamente.

A continuación (Tabla 2), se detalla el plan de localización obtenido para la cosecha de la variedad Early Red One, perteneciente al cuartel M13, el cual tiene una superficie de 4,5 hectáreas, aproximadamente.

TABLA 2. PLAN DE LOCALIZACIÓN DE BINS EN EL CUARTEL M13 AL 100%

PLAN DE LOCALIZACIÓN DE BINS									
Cuartel: M 13					Modalidad de cosecha: Barrido				
Entre Hileras	Número de Bins	Número de Manzanos	Distancia métrica	Distancia práctica	Entre Hileras	Número de Bins	Número de Manzanos	Distancia métrica	Distancia práctica
1	2	11	99	7,9	4	63	64	12	101
3	4	12	101	7,4	4	65	66	11	99
5	6	11	99	7,9	4	67	68	12	101
7	8	12	101	7,4	4	69	70	11	99
9	10	11	99	7,9	4	71	72	12	101
11	12	12	101	7,4	4	73	74	11	99
13	14	11	99	7,9	4	75	76	12	101
15	16	12	101	7,4	4	77	78	11	99
17	18	11	99	7,9	4	79	80	12	101
19	20	12	101	7,4	4	81	82	11	99
21	22	11	99	7,9	4	83	84	12	101
23	24	12	101	7,4	4	85	86	11	99
25	26	11	99	7,9	4	87	88	12	101
27	28	12	101	7,4	4	89	90	11	99
29	30	11	99	7,9	4	91	92	12	101
31	32	12	101	7,4	4	93	94	11	99
33	34	11	99	7,9	4	95	96	12	101
35	36	12	101	7,4	4	97	98	11	99
37	38	11	99	7,9	4	99	100	12	101
39	40	12	101	7,4	4	101	102	11	99
41	42	11	99	7,9	4	103	104	12	101
43	44	12	101	7,4	4	105	106	11	99
45	46	11	99	7,9	4	107	108	12	101
47	48	12	101	7,4	4	109	110	11	99
49	50	11	99	7,9	4	111	112	12	101
51	52	12	101	7,4	4	113	114	11	99
53	54	11	99	7,9	4	115	116	12	101
55	56	12	101	7,4	4	117	118	9	77
57	58	11	99	7,9	4	118	119	9	73
59	60	12	101	7,4	4	Total de bins a localizar cuartel M13:			685
61	62	11	99	7,9	4				

En la Tabla 2 se aprecia que la cantidad de bins a localizar entre ciertas hileras a una determinada distancia, tanto métrica (medida en metros) como práctica (medida en número de árboles entre los cuales espaciar los bins). Por ejemplo, para la primera fila de la Tabla 2 se deduce que entre las hileras 1 y 2 se deben localizar 11 bins (lo que significa abarcar 99 manzanos), a una distancia de aproximadamente 7,9 metros o cada 4 árboles.

4.2. Resultados Cuartel M4, Variedad Royal Gala

Tomando en cuenta los 320.766 kg. netos cosechados en la temporada 2009-2010, un peso promedio del bin de 386 kg. y el sistema de recolección mediante floreos, se proponen 5 alternativas para la localización de bins, basadas en distintos porcentajes de floreos posibles de llevar a cabo. Por lo tanto, se desarrolla un plan de localización de bins para floreos al 20%, 40%, 60%, 80% y al 100% de la producción. Sin embargo, los casos más comunes de floreo son al 20%, 60% y 100%. La superficie total de plantación considerada para este cuartel es de 6,4 hectáreas.

A continuación se presenta el plan de cosecha para un floreo de 40% de la producción.

4.2.1. Plan de Localización de Bins en el Cuartel M4 al 40%, Variedad Royal Gala

Según los resultados del modelo, para que los trabajadores de temporada recolecten el 40% de la fruta del cuartel M4, deben caminar en promedio 8,23 metros desde los manzanos asignados al bin seleccionado.

Es importante tener en cuenta que en los cuarteles existe distinto número de árboles por hilera, esto implica que no necesariamente se distribuirá el mismo número de bins por hileras, por lo tanto, para hacer operativa la localización de bins, en cada hilera se asignará un bin cada 16,96 metros o 7 árboles, que corresponde a la distancia promedio entre bins para un floreo al 40% (ver Tabla 3).

Debido a que el número de árboles en cada hilera es diferente, también puede ocurrir que se localice sólo un bin entre dos hileras, al inicio o al final de una de ellas, con el fin de recopilar la fruta de los árboles restantes en relación a la otra hilera. A manera de ilustración, en la Figura 1 se representa la localización de un bin entre las hileras 7 y 8, colocado al final de la hilera más extensa, abarcando un total de 27 manzanos, a una distancia de 33,78 metros y/o cada 14 árboles.



FIGURA 1: REPRESENTACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE BINS ENTRE LAS HILERAS 7 Y 8

A continuación se muestran los resultados del plan de localización de bins para el cuartel M4, variedad Royal Gala, para un floreo al 40%.

TABLA 3: PLAN DE LOCALIZACIÓN DE BINS CUARTEL M4 AL 40%

PLAN DE LOCALIZACIÓN DE BINS											
Cuartel: M 4			Modalidad de cosecha: Floreo al 40%								
Entre Hileras	Número de Bins	Número de Manzanos	Distancia métrica	Distancia práctica	Entre Hileras	Número de Bins	Número de Manzanos	Distancia métrica	Distancia práctica	Entre Hileras	Número de Bins
2	3	3	48	19,2	8	59	60	4	56	16,9	7
3	4	4	48	14,4	6	62	63	13	190	18,1	7
5	6	3	38	15	6	65	66	1	16	17,5	7
6	7	13	193	18,4	7	66	67	12	178	18,3	7
7	8	1	16	Localizar Final o Inicio de la Hilera		67	68	1	16	Localizar Final o Inicio de la Hilera	
10	11	9	139	19	8	70	71	4	61	18,4	7
11	12	4	52	15,6	6	71	72	1	13	Localizar Final o Inicio de la Hilera	
14	15	13	195	18,6	7	74	75	11	157	17,6	7
17	18	2	27	15,6	6	75	76	1	14	Localizar Final o Inicio de la Hilera	
18	19	14	214	18,9	8	77	78	3	43	17,1	7
19	20	1	16	Localizar Final o Inicio de la Hilera		78	79	8	123	18,9	8
21	22	1	16	17,5	7	81	82	1	12	12,5	5
22	23	15	218	18	7	82	83	10	142	17,5	7
23	24	2	25	14,4	6	83	84	2	29	16,9	7
26	27	14	205	18,1	7	86	87	13	185	17,6	7
27	28	1	10	Localizar Final o Inicio de la Hilera		89	90	2	28	16,3	7
29	30	3	40	15,8	6	90	91	9	134	18,3	7
30	31	14	212	18,8	8	91	92	1	16	Localizar Final o Inicio de la Hilera	
31	32	1	16	Localizar Final o Inicio de la Hilera		93	94	1	16	17,5	7
33	34	1	16	17,5	7	94	95	12	167	17,2	7
34	35	14	210	18,6	7	95	96	1	16	Localizar Final o Inicio de la Hilera	
35	36	3	40	15,8	6	101	102	2	29	16,9	7
37	38	4	50	15	6	102	103	10	141	17,4	7
38	39	2	32	18,8	8	103	104	1	13	Localizar Final o Inicio de la Hilera	
42	43	11	164	18,4	7	105	106	1	13	13,8	6
43	44	1	16	Localizar Final o Inicio de la Hilera		106	107	7	101	17,7	7
45	46	1	16	17,5	7	107	108	2	25	14,4	6
46	47	12	177	18,2	7	110	111	4	58	17,5	7
47	48	3	40	15,8	6	111	112	3	37	14,6	6
49	50	3	43	17,1	7	113	114	5	66	16	6
50	51	1	16	Localizar Final o Inicio de la Hilera		114	115	4	64	19,4	8
53	54	1	10	10	4	Total de bins a localizar cuartel M8:					336
54	55	3	40	15,8	6	Promedio distancia métrica:					16,96
55	56	1	11	Localizar Final o Inicio de la Hilera		Promedio distancia práctica:					7
58	59	7	108	18,9	8						

Para los planes de localización de bins con diferentes porcentajes de floreo se observó que, mientras mayor es el porcentaje de floreo, menor es la distancia promedio en que deben localizarse los bins.

4. Impacto de los Resultados Entregados para la Gestión de Huertos

La propuesta de planes de localización de bins para las diferentes variedades permite mejorar la planificación y coordinación de las labores de cosecha, pues con estas estimaciones es posible calcular la mano de obra y maquinaria necesaria para la cosecha de cada cuartel. Además, permite mejorar los rendimientos de los trabajadores en un aumento promedio de 17,21%.

Respecto al trabajo anterior (González-Araya *et al.*, 2009), se mejoró la estimación del parámetro de capacidad (k), el cual es diferente dependiendo de la variedad analizada. En el trabajo anterior, éste se mantuvo constante. De esta forma, los parámetros utilizados para las variedades Early Red One, Royal Gala y Granny Smith son 9, 7 y 8 árboles/bin, respectivamente, para los cuarteles M13, M4 y M8, considerando para los 3 un 100% de fruta a recolectar (modalidad de cosecha de barrido).

Respecto al impacto de los resultados en la mejora de los rendimientos, a continuación se describen para las variedades analizadas.

Para el cuartel M13, con variedad Early Red One, se propone un plan de localización, el cual disminuye en 58 centímetros la distancia promedio recorrida entre los manzanos asignados a un determinado bin, aumentando el rendimiento promedio de los cosecheros en 16,55%, expresado en el volumen de bins cosechados en una jornada de 8 horas.

Para el cuartel M4, con variedad Royal Gala, se presentan cinco planes de localización de bins, considerando floreos al 20%, 40%, 60%, 80% y 100%. Para este tipo de cosecha, según la opinión de expertos, se recomienda realizar por lo menos 3 floreos durante la temporada. Sin embargo, en la temporada 2008-2009, sólo fueron realizados dos floreos, siendo éstos al 60% y 40%. Comparando el plan de localización propuesto para el 60% de floreo con lo observado en la temporada 2008-2009, se consiguió disminuir la distancia promedio recorrida en 46 centímetros, implicando un aumento promedio en los rendimientos de los trabajadores de un 5,74%. Del mismo modo, comparando los resultados para el 40% de floreo, se obtuvo una reducción de la distancia promedio recorrida por los trabajadores en 1,81 metros, implicando un aumento de 18,15% en los rendimientos diarios de bins cosechados.

Para la variedad Granny Smith (cuartel M8), se obtuvo una disminución de la distancia promedio recorrida por los cosecheros en 1,47 metros aproximadamente, que en términos de rendimiento implica un aumento del 28,38%.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos para la localización de bins para variedades Rojas y Galas presentados por Ferreira (2006) y, posteriormente, en González-Araya *et al.* (2009), fueron estimados con parámetros que no consideran las características de cada variedad de manzana. Por esta razón, este trabajo es una mejora a la investigación anterior.

En González-Araya *et al.* (2009) se consideró una densidad de plantación (entre hilera/sobre hilera) idéntica para todas las variedades. Sin embargo, para el caso particular del huerto en estudio, estas densidades son distintas según cada tipo de variedad. Además, en el trabajo de Ferreira (2006) no se hace referencia a la cantidad de árboles polinizantes y a la distribución espacial que representan en el cuartel con la variedad predominante.

Cabe agregar que en González-Araya *et al.* (2009), la restricción de capacidad para las variedades rojas es de 8 árboles por bins, valor que no se contrasta con un historial de producción. Por otro lado, la cantidad a producir está sujeta siempre a un porcentaje de pérdida, el cual no es considerado en los cálculos en ese trabajo. Tampoco se considera en el modelamiento, el sistema de riego presente en cada cuartel, lo que determina si se está frente a hileras curvas o rectas, lo cual implica diferente número de hileras por cuartel.

En cuanto a los modelos de localización formulados (p -medianas capacitado y p -centros capacitado), luego de realizar una evaluación multicriterio a través de la Teoría de Utilidad Multiatributo, se decidió aplicar el modelo de p -medianas capacitado.

Teniendo en cuenta la diferencia de los objetivos de los modelos p -medianas y p -centros y la naturaleza NP -hard de estos problemas, se hace necesario que, para huertos de tamaño mayor, se desarrollen métodos heurísticos y, de esta forma, facilitar la planificación diaria de la distribución de bins en los huertos.

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se presentó un plan de localización de bins para los cuartos M13, M4 y M8, correspondientes a las variedades de manzanos Early Red One, Royal Gala y Granny Smith, obteniéndose un aumento de los rendimientos (bins cosechado/jornada) de 16,55%, 11,95% y 28,38%, respectivamente.

El sistema de localización planteado puede ser aplicado también a la cosecha de árboles polinizantes, considerando que éstos representan el 11% de la superficie plantada del cuartel en el cual están inmersos. Generalmente, la cosecha de polinizantes se realiza sin bins a piso (colocados en el suelo), pues las distancias que deben caminar los recolectores son bastante largas. Según lo observado, estas cosechas se realizan con carros porta bins, lo que significa que el tractorista debe acompañar en todo momento a la cuadrilla de trabajadores. Para una futura investigación, sería interesante estudiar los costos involucrados para la cosecha de polinizantes, bajo la modalidad de bins a piso y carro porta bins.

El sistema de riego es una limitante para el funcionamiento del sistema de localización propuesto, ya que el hecho de tener un sistema de riego por curvas de nivel implica que no se tenga el mismo número de árboles por hilera. Esto obliga a que el modelo considere los datos de la totalidad de la superficie, siendo prácticamente imposible utilizar una muestra replicable al resto de la superficie, elevando los tiempos de resolución.

Sin duda alguna, la etapa de cosecha refleja varias oportunidades a ser consideradas desde el punto de vista de la Ingeniería Industrial. Por ejemplo, el sistema que se emplea para determinar la carga frutal no se basa en ningún procedimiento estadístico que valide su confiabilidad. Para ello se podría realizar un estudio basado en las características propias de cada cuartel, teniendo en cuenta los respectivos indicadores de madurez, como por ejemplo el color de la fruta.

Los tractores asociados a la cosecha podrían ser analizados mediante el uso de simulación, con el fin de conocer cuántos tractores se requieren según una determinada tasa de llenado de bins. Para este mismo caso, podrían ser aplicados modelos de ruteo de vehículos, con el propósito de minimizar las distancias y los costos de combustible empleados en la recolección y localización de bins en huertos.

Referencias

- Albareda-Sambola, M., Díaz, J. A. y Fernández, E.** *Lagrangean Duals and Exact Solution to the Capacitated p -Center Problem*, Departament d'Estadística i Investigació Operativa, Articles de revista, 2006, <http://hdl.handle.net/2117/412>, 2010.
- Autran, L. F., González-Araya, M. C. y Carignano, C.** *Tomada de Decisão em Cenários Complexos*, Editora Thomson Learning, São Paulo, Brasil, 2004.
- Özsoy, F. A. y Pinar, M. Ç.** (2006), An exact algorithm for the capacitated vertex p -center problem, *Computers & Operations Research*, 33 (5), 1420-1436.
- Directorio de la industria frutícola Chilena 2010/2011. (s.f.). Recuperado el 25 de 12 de 2010, de <http://www.directoriofruta.cl/papeldigital/home.html>
- Ferreira, M.**, *Modelos de localización para optimizar proceso de cosecha en huertos de pomáceas pertenecientes a agrícola Gonzagri Ltda*, Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, 2006.
- Garey, M.R. y Johnson, D.S.**, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W.H. Freeman and Co., 1979.
- Ghiani, G., Laporte, G. y Musmanno, R.** *Introduction to Logistics Systems Planning and Control*, John Wiley & Sons, Ltd., London, 2004.
- González-Araya, M.C., Acosta E., L. y Ferreira S., M.** (2009), Una Propuesta de Optimización en el Proceso de Cosecha de Manzanas, *Anales del XLI SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, págs. 7.

- Hakimi, S. L.** (1964), Optimal Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph, *Operations Research*, 12, 450-459.
- Henríquez, E.** (22 de 12 de 2010). Siera y Llano. Recuperado el 23/12/2010 de 12 de 2010, de Chile, la agricultura de los campesinos:
<http://www.adismonta.com/sierrayllano/index.php?op=noticia&id=617>
- Higgins, A. J. y Laredo, L. A.** (2006), Improving Harvesting and Transport Planning within a Sugar Value Chain, *Journal of the Operational Research Society*, 57, 367–376.
- Jorquera, A.** (2006). Propuesta de un sistema de evaluación para seleccionar subcontratistas en empresa constructora De Mussy y Cía Ltda. Curicó: Universidad de Talca.
- Kariv O, Hakimi S. L.** (1979), An algorithmic approach to network location problems I: the p-centers, *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 37, 514-538.
- Kutangila, D.** (2005). Tesis Doctoral: Modelos Basados en "Soft Computing" para resolver problemas de localización. Granada: Universidad de Granada, Departamento de ciencias de la computación e Inteligencia Artificial.
- Lucas, M. T. y Chhaged, D.** (2004), Applications of Location Analysis in Agriculture: a Survey, *Journal of the Operational Research Society*, 55, 561–578.
- Lorena, L., y Senne, E.** (2003), A Column Generation Approach to Capacitated p-Median Problems, *Computers and Operations Research*, 31, 863-876.
- ODEPA – Oficina de Estudios y Políticas Agrarias de Chile**, *Información Censal - Frutales Mayores*, 18 de 08 de 2008), <http://icet.odepa.cl/exp/ficha.php>, 2010.
- Osman, I. H. y Christofides, N.** (1994), Capacitated Clustering Problems by Hybrid Simulated Annealing and Tabu Search, *International Transactions in Operational Research*, 1, 317–336.