

MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE COSECHA EN HUERTOS DE MANZANAS

Marcela C. González-Araya

Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca
Camino a Los Niches km. 1, Curicó, Chile
mgonzalez@utalca.cl

Wladimir E. Soto-Silva

Programa de Doctorado en Ingeniería y Tecnologías de la Información, Universidad de Lleida,
73, Jaume II, 25001, Lleida, España
wsoto@utalca.cl

Javier E. Gómez-Lagos

Escuela de Ingeniería Civil Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca
Camino a Los Niches km. 1, Curicó, Chile
jgomez10@alumnos.utalca.cl

Diego I. Caroca-Jara

Escuela de Ingeniería Civil Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca
Camino a Los Niches km. 1, Curicó, Chile
dcaroca10@alumnos.utalca.cl

RESUMEN

Uno de los principales factores que afecta la calidad de la manzana para exportación es el punto de maduración en la cual es cosechada. Por esta razón, en esta investigación se desarrollan y aplican dos modelos de optimización para apoyar la planificación de faenas agrícolas durante la temporada de cosecha en huertos de manzanas, considerando las ventanas de tiempo cuando la fruta se encuentra con los indicadores de madurez deseados. Los modelos buscan minimizar los costos de mano de obra, de uso de maquinaria y de pérdida de calidad de la fruta, donde además, uno de los modelos también minimiza los días en que se realiza la cosecha y los trabajadores ociosos. Estos modelos fueron aplicados a un huerto de manzanas de la Región del Maule, Chile, obteniéndose una importante disminución en los costos de mano de obra y en la pérdida de ingresos por cosechar fruta de baja calidad.

PALABRAS CLAVE. Programación Lineal Entera Mixta, Planificación de cosecha de pomáceas, IO en Agricultura.

AG & MA - IO en la Agricultura y el Medio ambiente

ABSTRACT

One of the main factors that affect the fresh apple quality is the maturation point in which the fruit is harvested. For this reason, in this research two optimization models are developed and applied for supporting agriculture activities planning decisions during an apple harvest season in order to achieve the desired maturation parameters. The models seek to minimize the labor costs, machinery use and loss of fruit quality, and additionally, one of the models seeks to minimize the number of harvest days in a season and the idle labor. These models were applied to an apple orchard of Maule Region, Chile, obtaining an important reduction in labor costs and in income loss for harvesting low quality fruit.

KEYWORDS. Mixed Integer Linear Programming, Pome Fruit Planning Harvest, OR in Agriculture.

AG & MA - OR in Agriculture and Environment

1. Introducción

La agricultura en Chile en los últimos años ha perdido competitividad. En el período desde 2005 a 2008 hubo una disminución progresiva de la tasa de crecimiento del sector agropecuario, siendo superada por el crecimiento del PIB Nacional (Contreras, 2008). Esta pérdida de competitividad se debe principalmente a la baja en un 30% del precio del dólar, a un alza de 300% en los precios de los insumos, tales como fertilizantes (Contreras, 2008), y a la disminución en la disponibilidad de mano de obra agrícola y al aumento de 12% en su costo (Domínguez, 2007, Alarcón, 2008).

Por otro lado, la industria chilena de la manzana ha tenido un dinámico desarrollo, logrando posicionar a Chile entre los cinco principales exportadores mundiales de manzanas, con un 10% de participación, equivalentes aproximadamente a 760.000 toneladas exportadas (Bravo, 2013). En Chile, la producción de manzana tiene una participación del 32% en el total de la fruta fresca exportada, siendo superada solamente por la uva, con un 35% de participación (CIREN y ODEPA, 2013). La plantación de manzanos en la Región del Maule corresponde al 54% del total de manzanos en el país (INE, 2007), donde, además, esta región tiene una participación del 62% de la producción total de manzana roja y del 46% de la manzana verde en el país (CIREN y ODEPA, 2013). En la actualidad, uno de los mayores desafíos que enfrenta esta industria es incrementar su liderazgo, requiriéndose para ello una mejor coordinación y planificación en todas las etapas de la cadena de suministro. Sin embargo, en la industria frutícola chilena, las decisiones en estas etapas se basan principalmente en la experiencia de sus participantes.

En relación a la etapa de cosecha de manzana fresca, uno de los principales factores que afecta la calidad de la fruta es el punto de maduración en la cual es cosechada. Por esta razón, la planificación de cosecha debe considerar este factor y programar el uso eficiente de los recursos para cuando la fruta se encuentre en su tiempo de recolección. Los principales recursos necesarios durante la cosecha de manzana son mano de obra, equipos y maquinaria, siendo la mano de obra el recurso crítico y más intensivo de este proceso. Al respecto, en los últimos 10 años, ha habido una disminución del 10% de la cantidad de trabajadores en las faenas agrícolas (Contreras, 2008), ocasionando un incremento en el costo de aproximadamente un 12% (Alarcón, 2008). Esta situación ha mermado la rentabilidad del productor, a pesar de que el rendimiento por hectárea ha crecido en aproximadamente 73% (Centro de Competitividad del Maule, 2010), pues, al no contar con la mano de obra necesaria para la recolección, la calidad de la fruta para exportación se ha visto perjudicada, al no ser recogida en su punto de maduración.

Dada la situación descrita anteriormente, en esta investigación se desarrollan y aplican dos modelos de optimización para apoyar la planificación de faenas agrícolas durante la temporada de cosecha en huertos de manzanas, considerando las ventanas de tiempo en que la fruta se encuentra con los indicadores de madurez deseados. Así mismo, los modelos buscan minimizar los costos de mano de obra, de uso de maquinaria y de pérdida de calidad de la fruta. Además, uno de los modelos propuestos considera también en su función objetivo la minimización de los días en que se realiza la cosecha y de los trabajadores ociosos durante la faena. Estos modelos han sido aplicados para planificar la cosecha de un huerto de manzanas de la Región del Maule, Chile, con el fin de analizar y comparar las soluciones obtenidas por ambos y hacer propuestas de mejoras a la planificación realizada por el huerto.

Este artículo se ha estructurado de la siguiente forma. En la Sección 2 se hace una revisión de modelos de programación matemática relacionados a la cadena de suministro frutícola. En la Sección 3 se describen los modelos propuestos para la planificación de cosecha en huertos de manzanas, los cuales serán analizados a través de un caso de estudio en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones de esta investigación.

2. Revisión de Modelos de Programación Matemática Relacionados a la Cadena de Suministro Frutícola

En la literatura, los primeros autores que usaron modelos de programación matemática para apoyar decisiones en la gestión de huertos de manzana fueron Willis y Halon (1976). En su investigación, estos autores desarrollaron un modelo de programación dinámica para determinar

la mezcla óptima de variedades de manzanas a plantar en un horizonte de largo plazo, el cual fue aplicado a un huerto de manzanas en Massachussets, USA.

En la revisión de literatura realizada por Zhang y Wilhelm (2011) son presentados modelos de programación matemática desarrollados para apoyar decisiones en diferentes industrias agrícolas (frutas, vegetales, bayas, uva y vino, entre otras). Estos autores dedican una sub-sección a modelos aplicados a la industria de manzanas, describiendo brevemente modelos de programación matemática con diferentes objetivos, siendo éstos: bio económicos (Hester y Cacho, 2003), de planificación de la plantación (Childs, 1983; Kearnev, 1994), de mezcla óptima de variedades (Willis y Halon, 1976) y de administración de cámaras de frío en una planta de embalaje de manzanas (Starbird, 1988).

Por otro lado, Blanco et al. (2005) propusieron un modelo de programación lineal mixta entera para planificar las operaciones de una planta de embalaje de manzanas y peras, el cual busca maximizar las utilidades de la planta. Este modelo fue aplicado a una planta de embalaje localizada en Argentina.

En relación a modelos de programación matemática para apoyar decisiones de planificación de la cadena de suministro de la industria de manzanas, Masini et al. (2003) propusieron un modelo para la planificación táctica de la cadena de suministro de una empresa exportadora de manzanas y peras. Siguiendo esta línea de investigación, otros modelos desarrollados para planificar la cadena de suministro frutícola fueron presentados por Ortmann *et al.* (2006), Masini *et al.* (2007), Masini *et al.* (2008) y Català *et al.* (2013).

En una línea de investigación relacionada, Ahumada y Villalobos (2009) realizaron una revisión de la literatura orientada a modelos de planificación de la producción y distribución de cadenas de suministros de agro-alimentos, basadas en cosechas agrícolas. Otras revisiones de la literatura sobre modelos de programación matemática para apoyar decisiones en la cadena de suministro agrícola pueden ser encontradas en Glen (1987), quien presenta modelos para apoyar la planificación de las actividades en granjas, Audsley y Sandars (2009), quienes clasifican los modelos según las técnicas de investigación de operaciones utilizada, Weintraub y Romero (2006) y Bjorndal et al. (2012), quienes dedican una sección de su investigación a modelos en el área agrícola, Higgins et al. (2010), quienes discuten los desafíos para la adopción de modelos de investigación de operaciones en la cadena de valor agrícola, y Shukla y Jharkharia (2013), quienes clasifican los modelos usados en la cadena de suministro de productos agrícolas frescos de diversas formas (país, año, contexto del problema, técnica usada, entre otras).

Algunos modelos de programación matemática desarrollados en Chile para apoyar decisiones en la etapa de cosecha se han aplicado principalmente en la industria forestal. Palma y Troncoso (2001) desarrollaron y utilizaron un modelo de programación lineal para la asignación óptima de equipos en faenas de cosecha forestal. Troncoso et al. (2002) formularon un modelo de programación mixta entera para resolver simultáneamente tres problemas enfocados a la producción, localización de instalaciones y distribución de carga en la industria forestal.

Dentro de la planificación de cosecha frutícola en Chile, se encuentra la investigación de Ferrer et al. (2008), quienes propusieron un modelo de programación lineal mixta entera para determinar el plan de cosecha de uvas, con el objetivo de minimizar los costos operativos y de maximizar la calidad de la uva. En un trabajo posterior, Bohle et al. (2010) incorporaron la incertidumbre en los datos al modelo de Ferrer et al. (2008), la cual trataron mediante optimización robusta. En 2015, González-Araya *et al.* (2015) desarrollaron un modelo de programación matemática para apoyar decisiones de planificación de cosechas en un huerto, el cual busca minimizar la cantidad de recursos utilizados en las faenas, garantizando la obtención de fruta de buena calidad para ser exportada. Además, con este modelo se obtiene un cronograma de cosecha que minimiza la pérdida de fruta por no alcanzar los parámetros de calidad deseables para su exportación.

En esta investigación se propone una extensión del modelo de González-Araya *et al.* (2015), incorporando en la función objetivo una penalización por tener mano de obra ociosa y una penalización por los días que demora la cosecha. Esta extensión busca reducir el tiempo ocioso de los trabajadores fijos y fomentar que los cuarteles de un huerto sean cosechados en días

consecutivos.

En la siguiente sección se describe en detalle la extensión del modelo de González-Araya *et al.* (2015).

3. Modelo para la Planificación de Cosecha en Huertos de Manzana

Los modelos descritos en esta sección, serán comparados con el fin de analizar sus soluciones óptimas, tanto desde el punto de vista computacional, como táctico (facilidad de implementar la solución). Los dos modelos proponen una planificación táctica de cosecha manzanas, obteniéndose un calendario de cosecha por cuartel en un huerto determinado. A estos cuarteles se les asigna su respectiva mano de obra, maquinaria y equipos, durante la ventana de tiempo en que la variedad de fruta plantada alcanza sus indicadores óptimos (calibre, color, firmeza, dulzor).

El modelo A corresponde al modelo propuesto por González-Araya *et al.* (2015), el cual busca minimizar los costos de mano de obra, insumos y pérdida de fruta por baja calidad. Este modelo incorpora la experiencia e información de los encargados del huerto a través de parámetros tales como: estimación de cosecha, tipo de cosecha (barrido o floreo), destino de la fruta de cada uno de los cuarteles del huerto y los requerimientos de calidad exigidos para la fruta de exportación (parámetros de calidad y fechas idóneas de cosecha).

El modelo B es una extensión del modelo A, el cual incorpora nuevas variables de decisión, siendo éstas: la cantidad de fruta no cosechada en un cuartel (S_c), la cantidad de trabajadores fijos ociosos en un dado periodo (BF_t) y el número de trabajadores variables contratados en cada periodo (TV_t). Además, se considera en la función objetivo la minimización del costo total por tener trabajadores ociosos y de los días de cosecha en el huerto. De esta forma, en el modelo B es posible que los trabajadores fijos no sean asignados a cosechar un cuartel, es decir, tengan días ociosos. El modelo B también busca cosechar los cuarteles en días consecutivos, minimizando los días totales para realizar la cosecha.

A continuación se presenta en detalle la formulación matemática del modelo B.

Conjuntos y parámetros usados en la formulación

K : Conjunto de modos de cosecha, $K = \{1: \text{cosecha mecánica}, 2: \text{cosecha manual}\}$,

C_k : Conjunto de cuarteles en un huerto que utilizan el modo de cosecha k , $k \in K$,

C : Conjunto de cuarteles a ser cosechados en un huerto, $C = C_1 \cup C_2$, donde C_1 corresponde a los cuarteles a cosechar en forma mecánica y C_2 corresponde a los cuarteles a cosechar en forma manual,

O : Conjunto de tipos de mano de obra existente, $O = \{1: \text{mano de obra fija}, 2: \text{mano de obra variable}\}$,

P : Conjunto de plantas procesadoras de fruta, $P = \{1: \text{para exportación}, 2: \text{comercial}\}$,

T : Horizonte de planificación de cosecha de un huerto,

A_{ct} : Porcentaje de pérdida de manzanas debido a mala calidad de la fruta en el cuartel c , $c \in C$, en el período t , $t \in T$,

H_l : Costo de contratar una unidad de mano de obra tipo l , $l \in O$,

F_l : Costo de despido de una unidad de mano de obra tipo l , $l \in O$,

J_{cl} : Costo de la mano de obra tipo l , $l \in O$, para la jornada laboral en el cuartel c , $c \in C_2$,

Q : Costo por hora de trabajo de una máquina en la cosecha,

P_c : Productividad de la cosecha en forma mecánica en el cuartel c , $c \in C_1$, expresada en kilogramos por hora,

RF_c : Productividad de la mano de obra fija para la cosecha en forma manual en el cuartel c , $c \in C_2$, expresada en kilogramos/hombre,

RV_c : Productividad de la mano de obra variable para la cosecha en forma manual en el cuartel c , $c \in C_2$, expresada en kilogramos/hombre,

D_c : Kilogramos de manzana a cosechar en el cuartel c , $c \in C$,

G_{pt} : Kilogramos máximos de manzana que pueden ser procesados en la planta p , $p \in P$, en el período t , $t \in T$,

- N_{ct} : Kilogramos máximos de manzana que pueden ser cosechados en el cuartel c , $c \in C$, en el período t , $t \in T$,
- L_k : Kilogramos mínimos de manzana que pueden ser cosechados en un cuartel usando el modo de cosecha k , $k \in K$,
- I_t : Máximo de horas disponibles de la maquinaria en el período t , $t \in T$,
- λ : Parámetro de penalización por cosechar la fruta sin las condiciones de madurez requeridas. Además, se utiliza para transformar los kilogramos perdidos de fruta a pesos o unidades monetarias.
- N : Número mínimo de mano de obra fija necesaria para la cosecha. Estos trabajadores son contratados para toda la temporada, con el fin de iniciar y terminar las faenas de cosecha,
- W : Número máximo de mano de obra variable permitido en la planificación de cosecha. Este valor es constante para toda la temporada,
- E : Promedio de los kilogramos máximos que puede contener un bin (contenedor para colocar la fruta),
- PL_{cp} : corresponde a un parámetro que indica si la fruta del cuartel c será enviada o no a la planta p , $c \in C$, $p \in P$,
- PO : Costo de tener a un trabajador ocioso,
- α : Parámetro de penalización por cosechar en días no consecutivos en un cuartel. Además, se utiliza para transformar los días de cosecha a pesos o unidades monetarias.

Variables de decisión

- X_{ct} : Kilogramos de manzana cosechados en el cuartel c , $c \in C$, en el período t , $t \in T$,
- $Y_{ct} \in \{0, 1\}$, donde $Y_{ct} = 1$, si se cosecha en el cuartel c , $Y_{ct} = 0$ en caso contrario, $c \in C$, en el período t , $t \in T$,
- THF : Número de trabajadores contratados durante todo el período de cosecha,
- THV_t : Número de trabajadores variables contratados al inicio del período t , $t \in T$.
- TFV_t : Número de trabajadores variables despedidos al finalizar el período t , $t \in T$,
- TFC_{ct} : Número de trabajadores fijos asignados al cuartel c , $c \in C_2$, en el período t , $t \in T$,
- TVC_{ct} : Número de trabajadores variables asignados al cuartel c , $c \in C_2$, en el período t , $t \in T$,
- HMQ_{ct} : Horas-máquina necesarias para la cosecha del cuartel c , $c \in C_1$, en el período t , $t \in T$,
- NB_{ct} : Número de bins necesarios en el cuartel c , $c \in C$, en el período t , $t \in T$,
- S_c : Kilogramos de fruta no cosechada en el cuartel c , $c \in C$,
- BF_t : Número de trabajadores fijos ociosos en el periodo t , $t \in T$,
- TV_t : Número de trabajadores variables que realizan faenas agrícolas durante el día t , $t \in T$.

Función Objetivo

$$\sum_{t \in T} \sum_{c \in C_1} Q \times HMQ_{ct} + (H_1 + F_1) \times THF + \sum_{t \in T} F_2 \times TFV_t + \sum_{t \in T} H_2 \times THV_t + \sum_{t \in T} \sum_{c \in C_2} J_{c1} \times TFC_{ct} + \sum_{t \in T} \sum_{c \in C_2} J_{c2} \times TVC_{ct} + \lambda \times \left(\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} A_{ct} \times X_{ct} + \sum_{c \in C} S_c \right) + PO \times \sum_{t \in T} BF_t + \alpha \times \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} t \times Y_{ct} \quad (1)$$

La función objetivo (1) minimiza los costos de cosecha del huerto. El primer término representa los costos por cosechar de modo mecánico. El segundo término se refiere a los costos de contratación y despido del personal fijo. El tercer y cuarto término consideran los costos de despido y contratación del personal variable, respectivamente. El quinto y sexto término representan los costos de cosechar la fruta con el personal fijo y variable, respectivamente. El séptimo término corresponde al costo de penalización por cosechar la fruta en una ventana de tiempo no adecuada y por dejar fruta sin cosechar en los cuarteles. Todos estos términos también son considerados en el modelo A formulado por González-Araya *et al.* (2015). Por otro lado, en el modelo B se agregan dos nuevos términos a la función objetivo, siendo éstos: el octavo término, el cual incorpora los costos de tener trabajadores ociosos y el noveno término, el cual considera los costos por los días de cosecha transcurridos durante una temporada.

La penalización por pérdida de calidad de la fruta, λ (\$/kg), fue propuesta en el trabajo de González-Araya *et al.* (2015). Este parámetro permite valorar en unidades monetarias la fruta que no es cosechada en su ventana de tiempo y el valor corresponde al monto que deja de percibir un productor cuando un kilogramo de manzana es clasificado como fruta comercial, en lugar de fruta de exportación, disminuyendo su retorno.

Para conseguir la minimización de la suma de todos los días de cosecha, éstos se multiplican por un factor de penalización α , el cual transforma los días de cosecha en unidades monetarias. Este factor busca alcanzar una cosecha más ordenada y, en lo posible, que la cosecha de un cuartel se realice en días consecutivos, con el menor número de interrupciones posible.

Restricciones

$$\begin{aligned} \sum_{c \in C} PL_{cp} \times X_{ct} &\leq G_{pt} && \forall p \in P, t \in T && (2) \\ \sum_{t \in T} X_{ct} + S_c &= D_c && \forall c \in C && (3) \\ X_{ct} &\leq N_{ct} \times Y_{ct} && \forall c \in C, t \in T && (4) \\ X_{ct} &\geq L_k \times Y_{ct} && \forall k \in K, c \in C_k, t \in T && (5) \\ X_{ct} &\leq P_c \times HMQ_{ct} && \forall c \in C_1, t \in T && (6) \\ X_{ct} &\leq RF_c \times TFC_{ct} + RV_c \times TVC_{ct} && \forall c \in C_2, t \in T && (7) \\ E \times NB_{ct} &\geq X_{ct} && \forall c \in C, t \in T && (8) \\ \sum_{c \in C_1} HMQ_{ct} &\leq I_t && \forall t \in T && (9) \\ \sum_{c \in C_2} TFC_{ct} + BF_t &= THF && \forall t \in T && (10) \\ THF &\geq N && \forall t \in T && (11) \\ \sum_{c \in C_2} TVC_{ct} &\leq W && \forall t \in T && (12) \\ \sum_{c \in C_2} TVC_{ct} &= TV_t && \forall t \in T && (13) \\ \sum_{c \in C_2} TVC_{ct} &= THV_t && \forall t = 1 && (14) \\ TV_t &= TV_{t-1} + THV_t - TFV_{t-1} && \forall t \in T: t \geq 2 && (15) \\ TV_T &= THV_T && \forall t \in T && (16) \\ Y_{ct} &\in \{0,1\} && \forall c \in C, t \in T && (17) \\ X_{ct}, HMQ_{ct}, S_c &\geq 0 && \forall c \in C, t \in T && (18) \\ THF, NB_{ct}, THV_t, TFV_t, TFC_{ct}, TVC_{ct}, BF_t, TV_t &\in Z^+ && \forall c \in C, t \in T && (19) \end{aligned}$$

La restricción (2) asegura que la fruta cosechada en el huerto no supere la capacidad de producción de la planta. La restricción (3) establece que la fruta cosechada en un cuartel durante su respectiva ventana de tiempo más los kilogramos de fruta que no son cosechados sean igual a toda la fruta disponible en el cuartel. La restricción (4) asegura que la fruta que se cosecha en un día en un cuartel, no supere el límite permitido para ese día. La restricción (5) asegura que si un cuartel es cosechado, dicha cosecha debe ser mayor o igual a una cantidad mínima rentable de cosecha. Las restricciones (6) y (7) aseguran que la cantidad de fruta cosechada en un cuartel no supere la productividad, ya sea de la maquinaria ($c \in C_1$), o de la mano de obra fija y variable ($c \in C_2$), respectivamente. La restricción (8) permite contar con el número suficiente de bins en un cuartel, durante un dado día, para realizar la cosecha. La restricción (9) asegura que no se utilice la maquinaria en más horas de las que hay disponible en un día. La restricción (10) establece que la mano de obra fija asignada en un día a diferentes cuarteles, más la que se encuentra ociosa en ese día, sea igual al total de mano de obra fija contratada para la temporada. La restricción (11) garantiza que la mano de obra fija contratada sea mayor a una cantidad mínima requerida por el encargado del huerto. La restricción (12) asegura que la cantidad de mano de obra variable no supere la cantidad máxima requerida diariamente por el encargado de huerto. La restricción (13) establece que la mano de obra variable asignada diariamente a los cuarteles del huerto sea igual a la mano de obra variable contratada en ese día. La restricción (14) establece el número de mano de obra variable disponible en el primer día de cosecha y la restricción (15) establece el balance de mano de obra variable contratada para los demás días de la temporada. La restricción (16) asegura que la mano de obra variable disponible en el último día de la temporada sea despedida. Las restricciones (17), (18) y (19) corresponden a las restricciones sobre la naturaleza de las variables de decisión del modelo matemático (variables binarias, continuas o enteras).

4. Caso de Estudio

Los modelos A y B han sido aplicados para planificar la cosecha de un huerto frutícola de la Región del Maule, Chile. Los datos fueron obtenidos de la temporada de cosecha 2010, la cual tuvo una duración de 64 días.

A continuación se describen las características del huerto y se presentan los datos obtenidos para la formulación de los modelos. En la siguiente sub-sección se presentan los principales resultados de la aplicación de estos modelos.

4.1. Características del Huerto

En la Tabla 1 se presenta la información de los cuarteles del huerto estudiado, así como sus respectivas variedades de manzanas, modo de cosecha, kilogramos a cosechar estimados para las diferentes ventanas de cosecha y los días de inicio de estas ventanas durante la temporada.

TABLA 1. INFORMACIÓN DE COSECHA DE LOS CUARTELES, TEMPORADA 2010

Cuartel	Variedad	Modo de Cosecha	Cosecha estimada (kg)			Inicio de Ventanas de Cosecha (día)		
			Primer floreo	Segundo floreo	Comercial	Día Primer floreo	Día Segundo floreo	Día Cosecha Comercial
1	Red Chief	Manual	384.704	0	67.889	18	-	33
2	Braeburn	Manual	76.555	65.072	11.483	45	50	60
3	Royal Gala	Manual	36.231	36.231	31.055	1	6	16
4	Scarlet	Manual	548.497	0	96.794	18	-	33
5	Royal Gala	Manual	47.101	47.101	40.371	1	8	16

Es importante mencionar que las variedades de manzanas presentan dos tipos de cosecha: por barrido (se cosecha la totalidad de la fruta dentro de un cuartel, ya que toda madura al mismo tiempo); y por floreo (se realiza más de una cosecha durante la temporada para recoger la fruta del cuartel, ya que la fruta no madura en forma homogénea). En el huerto estudiado, las variedades que se cosechan por barrido corresponden a Red Chief y Scarlet. Las variedades que se cosechan por floreo son Braeburn y Royal Gala.

Por otro lado, las ventanas de tiempo en las cuales la fruta alcanza los indicadores de madurez para ser exportada (mejor calidad) es de aproximadamente 15 días. Luego de estos días, la fruta se deteriora rápidamente y no puede ser comercializada. Por esta razón, ha sido estimado el valor del porcentaje de pérdida de manzana (A_{ct}), tanto para exportación, como para comercial, el cual se presenta en la Tabla 2. En esta tabla se observa que el menor porcentaje de pérdida se obtiene sólo en cinco días de la ventana (entre los días 6 a 10). Por lo tanto, los modelos buscarán maximizar la fruta cosechada durante la ventana de tiempo en la cual la penalización es mínima. Cabe resaltar que después de que la fruta alcanza los indicadores óptimos de madurez (días 6 a 10), la fruta que no puede ser exportada ni tampoco puede ser consumida en el mercado local (porcentaje comercial es cero).

TABLA 2. VALORES DEL PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE CALIDAD PARA LA FRUTA DE EXPORTACIÓN Y COMERCIAL

Día de la Ventana de Cosecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Exportación (%)	0,95	0,9	0,7	0,55	0,4	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6
Comercial (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1										

En la Tabla 3 se presentan los valores de los demás parámetros usados en los modelos. Los valores son calculados en pesos chilenos a diciembre de 2014.

Cabe señalar el costo de la mano de obra utilizada en la cosecha puede ser estimado en función de la forma de pago que se establezca en cada huerto. Este pago a cada trabajador puede ser realizado por kilogramo cosechado, por bins diarios cosechados o por día trabajado. Para el caso de estudio, los costos corresponden a los valores promedio, por variedad de manzana y por cuartel, según los datos obtenidos de la cosecha anterior.

TABLA 3. VALORES DE LOS PARÁMETROS USADOS EN LOS MODELOS

Parámetro	Cantidad
<i>Costo Contratación personal fijo (\$)</i>	10.000
<i>Costo Despido personal fijo (\$)</i>	25.000
<i>Costo de contratación personal variable (\$)</i>	3.000
<i>Costo de despido de personal variable (4)</i>	5.000
<i>Capacidad Bins (kg)</i>	350
<i>Valor Penalización λ (\$/kg)</i>	89
<i>Número mínimo de personal fijo contratado</i>	8
<i>Cantidad mínima de fruta a cosechar manualmente (kg)</i>	10.000
<i>Máximo de Trabajadores Variables</i>	55

El factor de penalización α se le asigna un valor de uno (\$/día), dado que sólo busca la compactación del calendario de cosecha. El costo de un trabajador fijo ocioso es calculado restando una unidad monetaria menos al costo obtenido cuando un trabajador fijo es asignado para trabajar en un cuartel. Esto se hace con el fin de que, al minimizar los costos, se privilegie asignar la cantidad exacta de trabajadores en los cuarteles.

4.2. Principales Resultados

Los modelos propuestos han sido corridos en el software IBM ILOG OPL, versión 12.5, con una tolerancia de diferencia absoluta MIP de 1.0E-6 y una tolerancia de integralidad de 1.0E-5. El computador usado es HP de 8Gb de RAM, 1T de disco duro, con un procesador Intel Inside Core i5, 2.6GHz. Los principales resultados de las corridas se muestran en la Tabla 4.

En la Tabla 4 se observa que el GAP obtenido fue diferente de cero debido a las tolerancias de diferencia absoluta MIP y de integralidad. Esto significa que las variables enteras ya no pueden ser mejoradas, lo que no necesariamente es así para las variables continuas. Dado que el GAP es muy bajo, las soluciones obtenidas son óptimas o muy cercanas al valor óptimo. La diferencia entre el valor de la función objetivo del modelo A con la del modelo B se debe a las modificaciones hechas tanto en las restricciones, como en los parámetros. En la Tabla 5 se expone en detalle la diferencia de costos obtenidos en las funciones objetivo de ambos modelos. El menor tiempo computacional para la resolución del modelo B se puede atribuir a que en él se propuso una reducción de las dimensiones de las variables de decisión en relación al modelo A presentado en González-Araya *et al.* (2015).

TABLA 4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS

Resultados	Modelo A	Modelo B
<i>Valor de la F.O. obtenida</i>	\$17.354.998	\$17.353.444
<i>Iteraciones</i>	133.119	106.559
<i>GAP</i>	0,02%	0,01%
<i>Tiempo computacional (seg)</i>	00:00:26:78	00:00:18:78

TABLA 5. COMPARACIÓN DE COSTOS RESULTANTES EN CADA MODELO

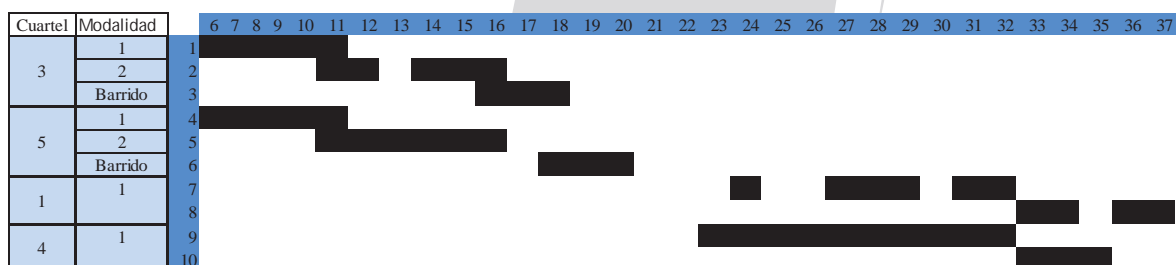
Resultados	Modelo A	Modelo B
<i>Función Objetivo</i>	\$ 17.354.998	\$ 17.353.445
<i>Costo de contratación y despido de mano de obra fija</i>	\$ 280.000	\$ 280.000
<i>Costo de contratación de mano de obra variable</i>	\$ 150.000	\$ 147.000
<i>Costo de despido de mano de obra variable</i>	\$ 250.000	\$ 245.000
<i>Salario de mano de obra fija</i>	\$ 5.120.000	\$ 3.350.000
<i>Salario de mano de obra variable</i>	\$ 3.633.000	\$ 3.647.000
<i>Costo de penalización por mala calidad de la fruta</i>	\$ 7.921.998	\$ 7.911.260
<i>Costo de penalización por no cosechar</i>	\$ 0	\$ 1.615
<i>Costo de mantener mano de obra fija ociosa</i>	\$ 0	\$ 1.769.823
<i>Costo de penalización por extensión del calendario</i>	\$ 0	\$ 1.747

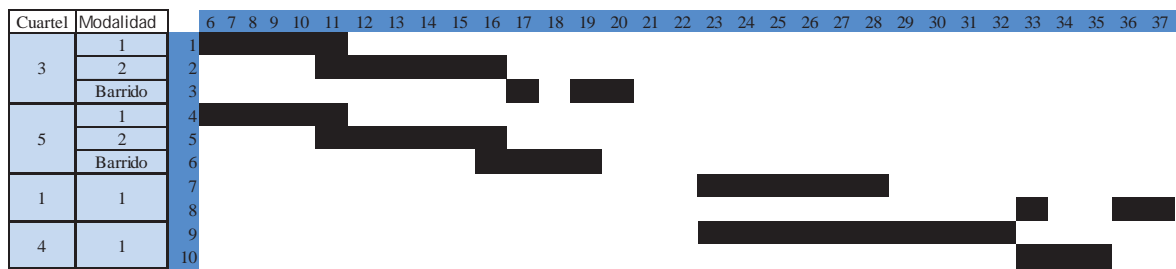
En cuanto a los costos de contratación y despido de mano de obra fija, éstos son los mismos en los diferentes modelos, ya que no existe variación en el personal contratado. Los costos de contratación y despido de los trabajadores variables son menores en el modelo B. Esto se debe a que éstos se mantienen por más tiempo en la cosecha, por lo cual no se hace necesario su contratación y despido reiterado. Por esta misma razón, el salario de la mano de obra variable es mayor en el modelo B. El salario de la mano de obra fija es menor en el modelo B. Sin embargo, esto ocurre debido a que se consideran por separado los costos de mantener mano de obra fija ocupada y ociosa.

En relación a la diferencia en los costos de penalización por la mala calidad en la fruta, éstos son menores en el modelo B, dado que no se cosecha toda la fruta del huerto. Por lo tanto, en este modelo, si la fruta no es rentable, no se cosecha, reduciendo a su vez la utilización de mano de obra.

El costo de penalización por no cosechar tiene valor entero positivo en el modelo B y este costo no es considerado en el modelo A.

En las Figuras 1 y 2 se muestran las soluciones obtenidas para los días de cosecha 6 a 37, a manera de ejemplo, con cada uno de los modelos propuestos. En estas figuras se observa el calendario de cosecha obtenido para los cuarteles 1, 3, 4 y 5.


FIGURA 1. CALENDARIO DE COSECHA PROPUESTO POR EL MODELO A


FIGURA 2. CALENDARIO DE COSECHA PROPUESTO POR EL MODELO B

Como se observa en las figuras presentadas, si bien el modelo B no logra que todos los cuarteles sean cosechados en días consecutivos, obtiene un calendario de cosecha más compacto que el modelo A. Un ejemplo de esto se aprecia en los cuarteles 5 y 3. La razón por la cual un cuartel no es necesariamente cosechado en días consecutivos, como es el caso del cuartel 1, se debe a que el modelo B prioriza reducir los días de cosecha totales, pudiendo cosechar diferentes cuarteles en paralelo. Esto significa que la mano de obra es ocupada en menos días, pero la cosecha de un cuartel puede ser aplazada algunos días, aún cuando ya se haya comenzado su cosecha.

En las Tabla 6 y 7 se presentan los resultados obtenidos con el modelo B para la planificación para los kilogramos de fruta a cosechar y de la mano de obra total a utilizar durante las ventanas de cosecha de los cuarteles 3 y 5 (días 6 al 20 de la temporada).

TABLA 6. PLANIFICACIÓN DE LOS KILOGRAMOS A COSECHAR DURANTE LA TEMPORADA SEGÚN LOS RESULTADOS DEL MODELO B

Kg. Cosechados		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
3	1	1	8.787	3.889	1.194	2.787	13.592	5.982	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	2	-	-	-	-	-	4.205	4.512	10.217	1.205	14.717	1.376	-	-	-	
	Barrido	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.600	-	14.400	13.055
5	1	4	6.000	10.898	13.592	12.000	1.194	3.398	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	5	-	-	-	-	-	2.409	11.705	6.000	15.012	1.500	10.475	-	-	-	
	Barrido	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.200	16.200	15.171	1.800	-
Kg Totales			14.787	14.787	14.787	14.787	14.787	15.995	16.217	16.217	16.217	16.217	19.051	19.800	15.171	16.200	13.055

TABLA 7. PLANIFICACIÓN DE LA MANO DE OBRA TOTAL A UTILIZAR DURANTE LA TEMPORADA SEGÚN LOS RESULTADOS DEL EL MODELO B

N° Trabajadores		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
3	1	1	11	7	3	7	12	4	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	2	0	0	0	0	0	4	6	11	2	14	1	0	0	0	
	Barrido	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	8	8
5	1	4	4	8	12	8	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	5	0	0	0	0	0	4	9	4	13	1	7	0	0	0	
	Barrido	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	9	9	1	0
M.O. Total			15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	12	11	9	9	8

Como se observa en las Tablas 6 y 7, la cosecha de los cuarteles 3 y 5 se distribuye de manera tal de minimizar el costo de mano de obra, considerando la mínima pérdida de calidad de fruta dentro de las ventanas de cosecha establecidas para cada uno de los cuarteles.

En los resultados obtenidos por el modelo B, se observa que la extensión propuesta al modelo de González-Araya *et al.* (2015) consiguen compactar los días de cosecha dentro de las ventanas de cada variedad, permitiendo mejorar la utilización de la mano de obra y reducir la pérdida de calidad de la fruta cosechada durante la temporada.

5. Conclusiones

Los modelos presentados son una herramienta de apoyo para las decisiones de planificación táctica en la cosecha de huertos de pomáceas, los cuales buscan minimizar los costos de mano de obra, recursos y pérdida de calidad de la fruta durante la temporada.

Actualmente, las decisiones de planificación de cosecha se basan en la experiencia de los encargados del huerto. La aplicación de los modelos permitirá que los encargados puedan estimar cuáles son las soluciones más convenientes para la temporada de cosecha, planificando con mayor exactitud la mano de obra, los recursos necesarios y el cronograma de cosecha para las faenas.

Los resultados de la aplicación de los modelos a un caso de estudio muestran que el modelo B obtuvo una mejor solución para la planificación de cosecha (menor valor de la F.O.), en menor tiempo computacional. El menor tiempo computacional del modelo B para alcanzar una solución óptima puede deberse a que para este modelo se realizó una reducción de las dimensiones de las variables de decisión en relación al modelo A.

Para futuras investigaciones se podría incluir una restricción que estableciera, específicamente para cada cuartel, que la cosecha se hiciera en días consecutivos.

Referencias

- Ahumada, O. e Villalobos, R.** (2009), Application of planning models in the agri-food supply chain: A review, *European Journal of Operational Research*, 196(1),1–20.
- Alarcón, R.** (2008) *Evolución del empleo en Chile: Principales resultados de la encuesta CASEN*, Santiago, Gobierno de Chile, 141 p., 2008.
- Audsley, E. e Sandars, D. L.** (2009), A review of the practice and achievements from 50 years of applying OR to agricultural systems in Britain, *OR Insight*, 22(1), 2–18.
- Blanco A.M., Masini G., Petracci N., e Bandoni J.A.** (2005) Operations management of a packaging plant in the fruit industry, *Journal of Food Engineering*, 70, 299–307.
- Bohle, C., Maturana, S., e Vera, J.** (2010), A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling, *European Journal of Operational Research*, 200, 245–252.
- Bravo M., J.** (2013). Manzana: una temporada de alto valor de exportaciones. Publicación de la oficina de estudios y políticas agrarias-Odepa. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile, Chile.
- Bjorndal, T., Herrero, I., Newman, A., Romero, C. e Weintraub, A.** (2012), Operations research in the natural resource industry, *International Transactions in Operational Research*, 19, 39–62.
- Catalá, L.P., Durand, G.A., Blanco, A.M., e Bandoni, J.A.** (2013), Mathematical model for strategic planning optimization in the pome fruit industry, *Agricultural Systems*, 115, 63–71.
- Centro de Competitividad del Maule** (2010), Informe Centro de Competitividad del Maule “Manzanos”. *Universidad de Talca*, Talca.
- Childs, R.A.**, A dynamic programming approach to apple orchard replacement. Ph.D. Dissertation, Cornell University, USA. A.E. Res. 83-11, 1983.
- CIREN – Centro de Información de Recursos Naturales, ODEPA – Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.** *Catastro Frutícola, Principales Resultados, Región del Maule/Junio 2013*, Chile, 2013.
- Contreras, O.** (2008), *Productividad de los Trabajadores Agrícolas*, Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2008.
- Domínguez, J.**, (2007), Recursos humanos en la agricultura. Trabajar con la mano de obra. *Revista de Extensión de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal UC*, 21: 6–10.
- Ferrer, J., MacCawley, A., Maturana, S., Toloza, S. e Vera, J.** (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations, *International Journal of Production Economics*, 112(2), 985–999.
- Glen, J.** (1987), Mathematical Models in Farm Planning: a survey, *Operations Research*, 35(5), 641- 665.
- González-Araya, M.C., Soto-Silva, W., Acosta-Espejo, L.**, Harvest Planning in Apple Orchards Using An Optimization Model, pp. 79-105. Em: *Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food Industry, International Series in Operations Research & Management Science*, 224, Plà-Aragónés, Lluís M. (Ed.), Springer, 2015.

- Hester, S.M., Cacho, O.** (2003) Modelling apple orchard systems, *Agricultural Systems*, 77,137–154.
- Higgins, A.J., Miller, C.J., Archer, A.A., Ton, T., Fletcher, C.S., e McAllister, R.R.J.** (2010), Challenges of operations research practice in agricultural value chains, *Journal of the Operational Research Society*, 61(6), 964–973.
- INE – Instituto Nacional de Estadísticas.** *Censo Agropecuario 2007*, Gobierno de Chile, Santiago, 2007.
- Kearnev, M.** (1994), An inter-temporal linear programming model for pipfruit orchard replacement decision, MAF Policy Technical Paper 94/6.
- Masini, G., Petracci, N., e Bandoni, A.** (2003) Supply chain planning in the fruit industry, Presented at FOCAPO 2003, Coral Springs, Miami, USA.
- Masini, G.L. Blanco, A. M. Petracci, N.C., e Bandoni, J.A.,** Chapter 5: Supply chain tactical optimization in the fruit industry, in: *Supply Chain Optimization*, Papageorgiou, L. and Georgiadis, M. (Eds.), John Wiley and Sons, New York, Volume 4, Part II, pp. 121–172, 2007.
- Masini, G.L., Blanco, A.M., Petracci, N.C., e Bandoni, J.A.** Chapter 31. Optimal Operational Planning in the Fruit Industry Supply Chain: in *Optimization in Food Engineering*, Ferruh Erdogdu (Ed.), CRC Press, Taylor and Francis Group, pp. 703–746, 2008.
- Ortmann, F. G., Vuuren, J. H., e van Dyk, F. E.** (2006), Modeling the South African fruit export infrastructure: a case study, *ORiON*, 22(1), 35–57.
- Palma I., C., e J. Troncoso T.** (2001), Asignación optima de equipos en faenas de cosecha forestal, *Revista El Bosque*, 22, 65-73.
- Starbird, S.A.** (1988), Optimal loading sequences for fresh-apple storage facilities, *Journal of the Operational Research Society*, 39(10), 911–917.
- Shukla M., e Jharkharia, S.** (2013), Agri-fresh produce supply chain management: a state-of-the-art literature review, *International Journal of Operations & Production Management*, 33(2), 114–158.
- Troncoso T., J., R. Garrido H., e X. Ibacache J.** (2002), Modelos de localización de instalaciones: Una aplicación para la producción y logística forestal, *Revista El Bosque*, 23, 57–67.
- Weintraub, A., Romero, C.** (2006), Operations Research Models and the Management of Agricultural and Forestry Resources: A Review and Comparison, *Interfaces*, 36(5), 446–457.
- Willis, C., Hanlon, W.** (1976), Temporal model for long-run orchard decisions, *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 24(3), 17–28.
- Zhang, W., Wilhelm, W.E.** (2011) OR/MS decision support models for the specialty crops industry: a literature review, *Annals of Operations Research*, 190, 131–148.