



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DOCTORAL EN INGENIERÍA QUÍMICA

PLANEAMIENTO ÓPTIMO EN LA
INDUSTRIA DE LA FRUTA

LUIS PEDRO CATALÁ

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2014



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DOCTORAL EN INGENIERÍA QUÍMICA

PLANEAMIENTO ÓPTIMO EN LA
INDUSTRIA DE LA FRUTA

LUIS PEDRO CATALÁ

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2014

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería Química, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería Química durante el período comprendido entre abril de 2009 y junio de 2014, bajo la dirección del Dr. J. Alberto Bandoni, y del Dr. Aníbal M. Blanco.

Luis Pedro Catalá



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el / /, mereciendo la calificación de(.....)

*a mi esposa,
mis papás
y mis hermanos*

Agradecimientos

A la Planta Piloto de Ingeniería Química, a la Universidad Nacional del Sur y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, por el apoyo económico y el marco institucional para la realización de esta tesis.

A mis directores, el Doctor Alberto Bandoni y el Doctor Aníbal Blanco, por su apoyo, consejo y compañía durante estos cinco años. No solo les quisiera agradecer por todo lo que me han ayudado desde lo académico, que sin dudas no es poco, sino también por el interés que siempre mostraron por mi persona toda.

Quisiera agradecer de forma especial a la ingeniera Patricia Villarreal del INTA Alto Valle, sin su ayuda desinteresada no habría sido capaz de captar y entender muchas de las particularidades que caracterizan a la actividad frutícola.

En la misma línea, quisiera agradecer a Via Fruta S.A, de forma particular a los ingenieros Jorge Procopio y Mariano Mignani. Ambos proveyeron una detallada descripción de la operatoria del negocio de la fruta fresca en la región del Alto Valle que fue de gran utilidad al momento de tener que formular los modelos matemáticos relacionados a la cadena de suministro de la manzana y la pera.

A mi tío, el ingeniero Carlos Pesce, con quien tuve el placer de compartir muchas conversaciones, de las que uno no se cansa de escuchar y aprender. Por haber intentado transmitirme parte de sus conocimientos relacionados a la actividad y, más valioso aún, la pasión con la que vive su profesión. A él y a mi tía Inés les tengo que agradecer también el hecho de haberme recibido en su casa en cada uno de los viajes que realicé al Alto Valle durante este tiempo.

A los chicos de la oficina, los que están –Fede y Tony– y los que estuvieron –Facu y Juan–, porque han sido más que compañeros de trabajo, compañeros de una etapa de mi vida. Gracias por su amistad.

A la gente del pasillo de Procesos, a todos les tengo que agradecer haber hecho mi

estadía en PLAPIQUI amena. De todos guardo momentos gratos compartidos.

Me siento orgulloso y dichoso al mismo tiempo de haber tenido la oportunidad de trabajar en PLAPIQUI, quisiera agradecer a todos los Plapiqueros en general.

No quisiera dejar de mencionar a Nora, por su atención y predisposición a solucionar cuanto inconveniente se me presentó.

A mi profesora de inglés, Silvana, que no solamente me enseña inglés, sino que también me ayudó y corrigió todos los textos en inglés que han ido surgiendo como frutos de mi investigación.

En el plano personal, quisiera empezar agradeciendo a mis papás. Todo lo que soy se los debo a ellos. Han sacrificado su vida por mí y mis hermanos para que nunca nos falte nada y podamos siempre aspirar a cumplir nuestros sueños.

A mis hermanos, Anita, Mario y Carito, por acompañarme y aguantarme todos estos años, por ayudarme y estar cada vez que los necesité.

A mi esposa, Sol, por caminar a mi lado de forma incondicional, por ayudarme a buscar constantemente la mirada de Aquel que nos encontró y nos unió.

No me puedo olvidar de mis primos, Ale y Gabi, me han ayudado y acompañado siempre. De forma especial desde que llegué a Bahía a estudiar.

A todos mis amigos, que estuvieron cada vez que los busqué y me buscaron cada vez que supieron que los necesité sin tener que decírselos, gracias porque tampoco podría haber concluido esta etapa sin su ayuda.

Quisiera terminar compartiendo un fragmento de una poesía de Eugenio Montale que describe un reclamo que ha estado latente en mi vida, de forma particular en este tiempo:

*Bajo el denso azul
del cielo un ave marina vuela;
nunca descansa, porque todas las imágenes llevan escrito:
‘más allá’*

Resumen

En esta tesis se aborda el planeamiento óptimo en la industria de la fruta de pepita, con especial énfasis en el complejo productivo-industrial de peras y manzanas localizado en la región del alto valle de Río Negro y Neuquén. La toma de decisiones en esta actividad presenta desafíos importantes relacionados con la incertidumbre existente en los segmentos productivo y de comercialización, la naturaleza estacional del negocio y la condición perecedera de sus productos. Específicamente se estudiaron los tres niveles de toma de decisión principales de cualquier cadena de suministro: estratégico, táctico y operativo.

A nivel estratégico, relacionado con la introducción de nuevos ítems a la cartera de productos de la empresa, se modeló el problema de reestructuración de la composición varietal. Este problema se considera relevante porque la modificación de la estructura de variedades de peras y manzanas de una chacra involucra grandes inversiones y períodos extensos hasta lograr la entrada en producción de las nuevas plantaciones.

En lo que respecta a los niveles de planeamiento táctico y operativo, se modeló la cadena de suministro de la fruta fresca desde los productores hasta los mercados finales, incluyendo las plantas de empaque y las cámaras frigoríficas, con el objeto de planificar los principales flujos e inventarios del sistema.

A nivel táctico, sobre la base de pronósticos de cosecha, costos y precios, se procura definir los programas de producción y venta que optimicen el beneficio del negocio. Este modelo permite evaluar el desempeño de diferentes infraestructuras para satisfacer la demanda prevista y estimar los requerimientos de servicios correspondientes. En modo operativo se incluyó un mayor nivel de detalle con el objeto de evaluar el impacto de corto plazo de decisiones operativas. Para posibilitar su resolución en un tiempo razonable y disponer de una forma práctica de reaccionar frente a eventos inciertos, se propone su empleo en el contexto de una estrategia de horizonte móvil.

Abstract

This thesis addresses optimal planning of the pip-fruit industry with particular emphasis on the productive-industrial complex located in the “Alto Valle de Río Negro y Neuquén” region. Decision making in this industry presents challenging features related to the inherent uncertainty in the productive and commercialization segments, the seasonal nature of the activity and the perishable condition of its products. Specifically, three decision making levels of any supply chain system were addressed: strategic, tactical and operational.

At the strategic level, the restructuring of the apple and pears varieties composition related to the inclusion of new items in the product portfolio of the company was addressed. This problem is considered relevant since the modification of the varieties structure in farms involves large investments and extensive periods until the new plantation production start.

Regarding tactical and operative levels, the fresh fruit industry supply chain was modelled from production farms to final markets, including packaging plants and refrigeration facilities, aimed at planning the main fluxes and inventories along the system.

At the tactical level, based on harvest estimations and costs and prices forecasts, the production plans that optimize the business profit are investigated. This model allows the assessment of different infrastructures performance aimed at satisfying the expected demand and estimating the required logistics. In an operational mode, the described supply chain was modelled with a larger level of detail in order to evaluate the short term impact of operative decisions. Aimed at achieving solutions in reasonable computation times and being able to react in the face uncertain events in a practical fashion, its use within a rolling horizon strategy is proposed.

Certifico que fueron incluidos los cambios y correcciones sugeridas por los jurados.

Firma del Director

DR. GUILLERMO H. CRAPISTE
RECTOR
DR. DIEGO DUPRAT
SEC. GRAL. CONSEJO SUPERIOR UNIVERSITARIO

Índice general

Resumen	vii
Abstract	ix
1. Introducción	1
1.1. Organización jerárquica de decisiones	1
1.2. Motivación del modelado de la cadena de suministro	3
1.3. Objetivos de la investigación	4
1.4. Estructura de la tesis	5
1.5. Publicaciones	6
2. Descripción del sistema	9
2.1. Introducción	9
2.2. Estructura productiva	11
2.2.1. Producción primaria	11
2.2.2. Clasificación y empaque	17
2.2.3. Conservación frigorífica	20
2.2.4. Industrialización	21
2.2.5. Comercialización - mercados	22
2.2.6. Comercialización - transporte	27
2.3. Contexto internacional	28
2.3.1. Principales exponentes en manzana	28
2.3.2. Principales exponentes en pera	29
2.3.3. Argentina en el mundo	30
3. Planeamiento estratégico	35
3.1. Introducción	35
3.2. Descripción del problema	37
3.3. Casos de estudio	42
3.3.1. Análisis de escenarios de financiamiento	43

3.3.2. Análisis de sensibilidad	43
3.4. Resultados y discusión	45
3.4.1. Análisis de escenarios de financiamiento	45
3.4.2. Análisis de sensibilidad	52
3.5. Conclusiones	56
4. Planeamiento táctico	59
4.1. Introducción	59
4.2. Descripción del problema	64
4.2.1. Estructura de la cadena de suministro	64
4.2.2. Obtención de materia prima	66
4.2.3. Líneas de clasificación de fruta fresca	67
4.2.4. Conservación en cámaras de frío convencional (FC)	67
4.2.5. Conservación en cámaras de atmósfera controlada (AC)	68
4.2.6. Comercialización	70
4.2.7. Aspectos económicos	72
4.2.8. Subdivisión del horizonte de planeamiento	74
4.2.9. Objetivos del planeamiento táctico	75
4.3. Casos de estudio	77
4.4. Resultados y discusión	79
4.4.1. Variación de la cantidad de cámaras de frío convencional y atmósfera controlada	79
4.4.2. Variación de la cantidad de líneas de clasificación y empaque	91
4.4.3. Variación de la disponibilidad de transporte	95
4.5. Conclusiones	102
5. Planeamiento operativo	105
5.1. Introducción	105
5.2. Descripción del problema	106
5.2.1. Consideraciones del modelo de planeamiento operativo	106
5.2.2. Objetivos del planeamiento operativo	113
5.2.3. Resolución del MPO	115
5.2.4. Estrategia de resolución	116
5.2.5. Consideraciones adicionales	120
5.3. Casos de estudio	122
5.4. Resultados y discusión	122
5.4.1. MPO mediante estrategia de resolución RH	122

5.4.2. MPO mediante estrategia de resolución RH-iAC	123
5.4.3. Resolución MPO con RH-iAC. Función objetivo modificada mediante el factor de peso r	125
5.5. Conclusiones	137
6. Conclusiones y trabajo futuro	139
A. Formulación matemática MPE	143
A.1. Balances de superficie	143
A.2. Niveles de producción	146
A.3. Control de cosecha	147
A.4. Balances económicos	148
A.5. Financiamiento	151
A.6. Control de presupuesto	152
A.7. Densidad de plantación promedio	152
B. Datos Modelo estratégico	155
C. Nomenclatura. Modelo estratégico	159
D. Formulación matemática MPT	163
D.1. Obtención de Materia Prima	163
D.2. Líneas de clasificación	165
D.3. Almacenamiento en frío	168
D.3.1. Frío convencional	168
D.3.2. Atmósfera Controlada	169
D.4. Comercialización	174
D.4.1. Comercialización Ultramar	176
D.4.2. Satisfacción de la demanda	177
D.5. Ecuaciones de Costos	178
D.5.1. Obtención de Materia Prima	178
D.5.2. Líneas de clasificación	178
D.5.3. Almacenamiento en frío - Frío Convencional	179
D.5.4. Almacenamiento en frío - Atmósfera Controlada	179
D.5.5. Costo de logística y comercialización	180
D.5.6. Gastos generales	180
D.6. Ingreso por ventas	180
D.7. Funciones objetivo	181

E. Datos. Modelo táctico y operativo	183
E.1. Datos obtención de materia prima	183
E.2. Datos clasificación y almacenamiento	184
E.3. Datos comercialización ultramar	187
E.4. Datos costos	187
E.5. Datos Ventas	189
F. Nomenclatura. Modelo táctico y operativo	191
Bibliografía	197

Índice de figuras

1.1. Diagrama jerárquico de toma de decisiones.	2
2.1. Zonas productoras de fruta de pepita.	10
2.2. Estructura del complejo frutícola de manzana y peras.	12
2.3. Esquema calendario de cosecha.	13
2.4. Distribución de productores y superficie.	14
2.5. Variación en el tiempo de las inversiones en nuevas plantaciones.	15
2.6. Características de la superficie con plantaciones de frutales de pepita.	16
2.7. Distribución etaria de las plantaciones.	17
2.8. Importaciones de jugo en USA.	22
2.9. Evolución de las importaciones de pera y manzana en la UE.	24
2.10. Evolución de las exportaciones a Rusia.	25
2.11. Producción mundial de manzanas.	28
2.12. Producción mundial de peras.	29
2.13. Evolución del volumen y destino de la producción.	31
2.14. Exportación Argentina vs Hemisferio Sur.	32
3.1. Esquema de balances de superficie.	40
3.2. Evolución de la producción y densidad de plantación.	45
3.3. Evolución de las plantaciones de variedades específicas.	47
3.4. Volumen semanal recolectado.	48
3.5. Análisis económico - sin financiamiento.	48
3.6. Comparación escenarios de financiamiento.	50
3.7. Análisis económico - crédito 5 y 10 años.	51
3.8. Resultados análisis de sensibilidad - restricciones de cosecha.	53
3.9. Resultados análisis de sensibilidad - presupuesto inicial.	54
3.10. Resultados análisis de sensibilidad - tasa de descuento.	55

4.1. Estructura de cadena de suministro modelada.	65
4.2. Esquema del funcionamiento de las cámaras de AC.	69
4.3. Opciones permitidas de comercialización.	71
4.4. Esquema de comercialización a ultramar.	72
4.5. Definición del horizonte de planeamiento táctico.	74
4.6. Fruta procesada y distribución varietal - Variación capacidad de frío.	82
4.7. Perfiles de frío - Variación de cámaras de FC.	83
4.8. Perfiles de frío - Variación de cámaras de AC.	84
4.9. Volúmenes de venta por variedad por mercado. AC_3 y FC_2	87
4.10. Diferencias por mercado respecto a la demanda. AC_3 , $FC_1 - FC_5$	88
4.11. Diferencias por mercado respecto a la demanda. FC_2 , $AC_1 - AC_6$	89
4.12. Desviaciones temporales con respecto a la demanda. AC_3 , $FC_1 - FC_5$	90
4.13. Desviaciones temporales con respecto a la demanda. FC_2 , $AC_1 - AC_6$	91
4.14. Resultados obtenidos con la variación de la capacidad de procesamiento.	92
4.15. Volumen de venta por variedad por mercado. $PL_1 - PL_4$	93
4.16. Diferencias por mercado respecto a la demanda. $PL_1 - PL_4$	94
4.17. Desviaciones temporales con respecto a la demanda. $PL_1 - PL_4$	95
4.18. Resultados obtenidos con la variación de la capacidad de transporte.	96
4.19. Perfiles de frío - Variación de Tr	97
4.20. Volumen de venta por variedad por mercado. $Tr_1 - Tr_7$	99
4.21. Diferencias por mercado respecto a la demanda. $Tr_1 - Tr_7$	100
4.22. Desviaciones temporales con respecto a la demanda. $Tr_1 - Tr_7$	101
5.1. Configuración del sistema en función de FC.	108
5.2. Esquema estrategia RH.	118
5.3. Diagrama de flujo del enfoque RH.	119
5.4. Evolución en el tiempo estrategia RH.	124
5.5. Comparación estrategias de resolución del MPO.	125
5.6. Variación de los costos totales e incumplimiento de los perfiles.	126
5.7. Desviaciones temporales del MPO con respecto a perfiles del MPT.	128
5.8. Desviaciones por mercado del MPO con respecto al MPT.	129
5.9. Evolución de variables económicas con el nivel de cumplimiento.	132
5.10. Volumen diario de fruta procesada para distintos valores de r	134
5.11. Porcentaje de capacidad utilizada para diferentes escenarios de r	135
5.12. Perfiles de inventario de fruta almacenada.	136
A.1. Balances de superficie.	144

D.1. Esquema CS de la fruta.	164
D.2. Funcionamiento de cámaras de atmósfera controlada.	170
E.1. Precio 2011.	190

Índice de cuadros

2.1. Calendario de labores culturales.	13
2.2. Superficie y participación de variedades.	17
3.1. Estado inicial de la chacra.	44
3.2. Composición varietal final para los 3 escenarios de financiamiento.	52
4.1. Tamaño del problema correspondiente al caso base.	79
4.2. Variación en el tamaño del problema ante cambios en las capacidades.	79
4.3. Nivel de incumplimiento de la demanda (%).	80
4.4. Beneficios obtenidos (Millones de U\$S).	80
5.1. Identificación del encendido de cámara de FC.	109
5.2. Identificación del cambio de tipo de fruta almacenada en FC.	111
5.3. Resultados resolución MPO original.	116
5.4. Tamaño del modelo MPO utilizando RH-iAC.	121
5.5. Resultados resolución MPO con RH.	123
5.6. Resultados resolución MPO con RH-iAC.	124
B.1. Definición de los sets.	156
B.2. Precios de venta.	156
B.3. Costos fijos operativos.	157
B.4. Costos de inversión.	157
B.5. Calendario de cosecha.	157
E.1. Producción anual, inicio y fin de recolección por variedad.	184
E.2. Día de inicio y finalización de los meses y períodos de planeamiento táctico.	185
E.3. Distribución semanal de cosecha por variedad.	186
E.4. Parámetros de clasificación.	186

E.5. Capacidades relacionadas al procesamiento.	186
E.6. Calendario de los barcos en el puerto.	187
E.7. Costo de fruta fresca propia y de terceros.	187
E.8. Costo de empaquetado.	188
E.9. Costo de mano de obra.	188
E.10. Costos variables de almacenamiento.	188
E.11. Costos fijos de almacenamiento.	188
E.12. Costos de amortización y gastos generales.	188
E.13. Costo de logística, comercialización y transporte.	189
E.14. Perfiles de demanda – exportación.	189
E.15. Perfiles de demanda – mercado interno.	190

Capítulo 1

Introducción

En la presente tesis se desarrollan modelos matemáticos de asistencia en la toma de decisión para problemas de planeamiento en la cadena de suministro de la industria de la fruta de pepitas (manzanas y peras).

En este capítulo introductorio se describe el contexto general y los objetivos del problema de investigación bajo consideración. En particular, discutiremos la organización jerárquica de toma de decisiones en la industria de procesos. Adicionalmente, introduciremos el problema de modelado matemático de cadenas de suministro y su importancia dentro del proceso de toma de decisiones en los distintos niveles de planeamiento.

1.1. Organización jerárquica del proceso de toma de decisiones

Para poder operar en la industria, es necesario planificar una gran cantidad de decisiones que varían tanto en la frecuencia con la que deben ser tomadas, como en la longitud de los horizontes a las que aplican. En la Figura 1.1 se muestra la organización piramidal de las decisiones que se toman habitualmente en la industria de procesos de acuerdo a estos criterios.

A medida que se asciende en la pirámide (Figura 1.1), las decisiones involucradas son tomadas con menos frecuencia, pero consideran horizontes más largos. Por el contrario, al descender en la pirámide la frecuencia con la que las decisiones deben ser tomadas aumenta, mientras que disminuye la longitud del horizonte de su aplicación.

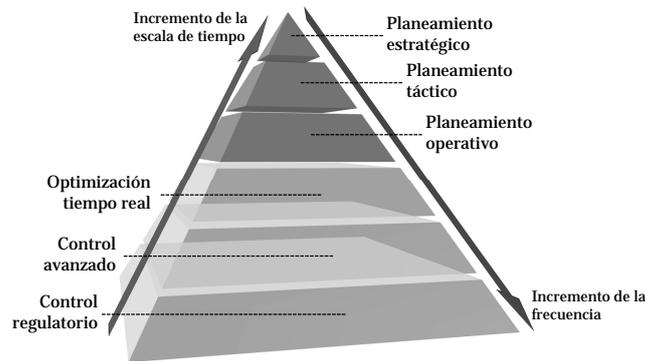


Figura 1.1 – Diagrama jerárquico de toma de decisiones.

Así por ejemplo, el planeamiento estratégico considera horizontes del orden de años, e involucra, entre otros, inversiones en desarrollo de nuevos productos e infraestructura. Le sigue el planeamiento táctico, cuyo ámbito está en el orden de los meses y las semanas. Aquí generalmente se realizan los programas de ventas, de adquisición de materia prima, etc. Por su parte, el planeamiento operativo considera decisiones en el orden de los días y las horas. Un problema característico de este tipo de planeamiento es el correspondiente al control de inventario. Finalmente, los niveles subsiguientes –optimización en tiempo real, control avanzado y control regulatorio– están asociados, en general, al control dinámico del proceso y no involucran planificación de actividades. Por este motivo, son resueltos en el orden de segundos o minutos.

Al modelar matemáticamente las actividades descritas, quedan planteadas como problemas de optimización de distinto tipo. Los problemas de planeamiento en general, asumen formulaciones mixto-entera lineales y no lineales (MILP y MINLP, por sus siglas en inglés). Por otro lado, los problemas asociados al control de procesos son usualmente problemas no lineales (NLP, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, las estrategias de resolución empleadas en cada caso deben ser diferentes.

A pesar de que en principio los campos de acción de las distintas instancias de toma de decisiones no estén necesariamente relacionadas y en general se estudian y resuelven por separado, para que una compañía pueda desarrollarse y aún subsistir en ambientes altamente competitivos e inciertos, se ha identificado la conveniencia de compartir y utilizar en forma eficiente e integrada información de todos ellos.

De esta forma, se busca que el resultado global de optimizaciones individuales en la pirámide de decisiones, estén a su vez “coordinadas óptimamente”, es decir que decisiones tomadas en diferentes niveles no se contrapongan entre sí ([Harjunkoski](#)

y otros, 2009). Esto conduce inevitablemente a problemas de optimización mucho más complejos que los correspondientes a los de las instancias aisladas, ya que los modelos matemáticos resultantes tienden a ser de mayor tamaño y deben cubrir objetivos de optimización integrales.

En esta tesis, estamos particularmente interesados en abordar los diferentes tipos de problemas asociados al planeamiento de actividades (estratégico, táctico y operativo) y su integración.

A este respecto, Bassett y otros (1996), y Shah (2005) presentan excelentes retrospectivas de la problemática de planificación de operaciones, indicando que la programación matemática y sus métodos de resolución constituyen la herramienta más efectiva para abordar el desafiante problema de integración de los niveles tácticos y estratégicos. Más recientemente Maravelias y Sung (2009) discuten los diferentes enfoques de resolución utilizados por investigadores y profesionales, y los desafíos aún pendientes relacionados al problema de integración de planeamiento táctico y operativo. A medida que avancemos en el desarrollo de la tesis iremos introduciendo aquellos trabajos que nos sirvieron de referencia a la hora de abordar cada problemática particular.

1.2. Motivación del modelado de la cadena de suministro

En la actualidad, el ágil y cambiante clima de los negocios, con rápidas variaciones en los mercados y sus tendencias, plantea un interesante desafío para la industria de procesos y manufacturera moderna. La necesidad de compartir información de forma eficiente e integrada entre los diferentes estamentos de toma de decisión de una dada compañía, se torna aún más imperiosa entre los nodos de la cadena de suministro de una dada industria.

En este contexto, el concepto de gestión de cadenas de suministro cobra fuerza. Por cadena de suministro (CS) entendemos una red de proveedores, plantas de procesamiento, almacenes, y canales de distribución organizados para adquirir la materia prima, convertir esta materia prima en productos terminados, y finalmente distribuir estos productos a los clientes (Bidhandi y otros, 2009). Por este motivo, la idea de desarrollar herramientas de asistencia de toma de decisiones para gestionar la problemática planteada, particularmente mediante la utilización de modelos de pro-

gramación matemática, se ha instalado decididamente tanto en el ámbito académico como industrial.

En este sentido, hay una vasta cantidad de trabajos relacionados al modelado de CS. Los enfoques utilizados por los investigadores son de lo más diversos, y realizar una síntesis completa del estado del arte aquí no es el objetivo de esta tesis. En cada capítulo en particular se presentarán las contribuciones relevantes a cada tema abordado. De forma general, el lector puede referirse a [Shapiro \(2001\)](#) para una amplia descripción del modelado de CS.

Todos los desarrollos de esta tesis serán aplicados a la producción y comercialización de manzana y pera fresca en la región del Alto Valle de Río Negro y Neuquén, una de las economías regionales más importantes de Argentina. Sobre esta actividad industrial, los trabajos sobre modelado de la CS no abundan, en parte debido a que el negocio frutícola presenta características particulares que hacen que los enfoques propuestos para la industria de procesos en general, no puedan ser aplicados directamente. En la tesis se presentarán las características que distinguen la actividad frutícola de otras industrias así como un detalle de los trabajos referidos a este sector.

La aplicación de herramientas de asistencia de toma de decisiones se presenta hoy como una oportunidad para empresas, o grupos de empresas, que buscan diferenciarse de la competencia, sacando provecho de las posibilidades que brinda el modelado matemático. Si bien estos desarrollos han ido ganando terreno en la industria de procesos en general, aún no se los aplica sistemáticamente en actividades de tradición más artesanal como lo es la industria frutícola. Esto se ve muy particularmente en nuestro país, donde solo recientemente existe algún proyecto que implica el modelado matemático en la industria de la fruta, que está siendo ejecutado por el grupo de investigación en cuyo marco se desarrolla la presente tesis.

1.3. Objetivos de la investigación y alcances del trabajo

A partir de lo mencionado en las secciones anteriores, se plantea el siguiente objetivo general de esta tesis:

- Desarrollar herramientas de optimización de toma de decisiones en la industria del sector frutícola, abarcando aspectos estratégicos, tácticos y operativos con vistas a mejorar la eficiencia operacional y del negocio del sector.

Éste a su vez se divide en los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollo de un modelo de planeamiento estratégico del reemplazo de plantaciones de fruta de pepita en las chacras.
- Desarrollo de un modelo de planeamiento táctico de la CS de la industria de la fruta de pepita.
- Desarrollo de un modelo de planeamiento operativo de la CS de la industria de la fruta de pepita.

Paralelamente a los objetivos académicos planteados al comienzo de la investigación de esta tesis, se tuvo un interés particular en que el conocimiento y los desarrollos que se pudieran realizar respondan a las necesidades concretas del sector en nuestro país, con el anhelo de que los mismos puedan eventualmente ser utilizados por productores, empresas e instituciones que participan en la CS de esta industria. Por este motivo es que a lo largo de los años en que se desarrolló la investigación se realizaron varios viajes a la región del Alto Valle de Río Negro y Neuquén, donde se visitaron empresas e instituciones del sector, además de realizar presentaciones sobre las diferentes propuestas de herramientas de asistencia a la toma de decisiones que se estaban desarrollando en la tesis.

1.4. Estructura de la tesis

El resto de la tesis se organiza como sigue. En el Capítulo 2 se presenta una descripción general del negocio frutícola nacional, que constituye el sistema que motiva este proyecto de investigación. En particular se detallan las características productivas de la región bajo estudio, así como también las características del negocio a nivel mundial y de los principales mercados de destino de la manzana y pera fresca argentina.

A continuación, el Capítulo 3 trata sobre el planeamiento estratégico de la reconversión de plantaciones de manzana y pera en una chacra. Mediante un modelo multi-período MILP desarrollado para tal fin, se optimizan diferentes estrategias de reconversión de frutales bajo diferentes escenarios de financiamiento, junto con un estudio de sensibilidad de parámetros relevantes del modelo como lo son el presupuesto inicial, la disponibilidad de mano de obra y la tasa de descuento considerada.

Posteriormente, en el Capítulo 4 se presenta el problema de planeamiento táctico de la CS de la industria de la fruta. En este caso, el modelo formulado también es un

modelo multi-período MILP, con la particularidad de que la longitud de los períodos no es uniforme, sino que quedan definidos en función de ciertos hitos temporales que caracterizan la operatoria del sector. Aquí, se trata simultáneamente la satisfacción de la demanda y la maximización de los beneficios económicos, planteando un problema de optimización multi-objetivo. Se realiza un análisis del efecto que producen diferentes cambios en la infraestructura disponible sobre los objetivos considerados, ejercicio que puede ser entendido como un estudio orientado al diseño de la CS.

Por su parte, en el Capítulo 5 se aborda el planeamiento operativo de CS. El modelo resuelto es similar al anterior, con la diferencia de que en este caso la discretización del horizonte de planeamiento es diaria, de manera de posibilitar la introducción de aspectos específicos que el modelo anterior no permite considerar. Adicionalmente se presenta una estrategia de resolución de tipo “horizonte móvil” que hace uso de información generada por el modelo táctico para orientar las decisiones. Se evalúa el desempeño del modelo en cuanto a tiempo de cómputo y calidad de las soluciones.

Finalmente, el Capítulo 6 presenta una síntesis de las principales contribuciones realizadas en esta tesis y se presentan algunas sugerencias para futuros trabajos de investigación.

Vale la pena aclarar que se ha optado por no incluir la formulación matemática detallada de los distintos modelos en el cuerpo de la tesis con el objetivo de posibilitar una lectura mas fluida de los resultados y discusiones. Versiones detalladas de los modelos, junto con los datos y nomenclatura correspondientes se presentan para todos los casos en sendos apéndices.

1.5. Publicaciones

El trabajo presentado en esta tesis se ha difundido parcialmente en las siguientes publicaciones:

- Catalá, L.P., Blanco, A.M., J.A. Bandoni. Planeamiento óptimo del reemplazo de variedades de fruta de pepita. VI Congreso Argentino de Ingeniería Química (CAIQ) (2010), Mar del Plata, Argentina.
- Catalá, L.P., Durand, G.A., Blanco, A.M., J.A. Bandoni. Mathematical model for strategic planning optimization in the pome fruit industry. *Agricultural Systems* (2013), 115, 63–71.

-
- Catalá, L.P., Moreno, S., Durand, G.A., Blanco, A.M., J.A. Bandoni. Optimal Production Planning of Concentrated Apple and Pear Juice Plants. 42 Jornada Argentina de Informática (JAIIO), Córdoba, Argentina.
 - Catalá, L.P, Blanco, A.M, J.A. Bandoni. Planeamiento óptimo en la industria de la fruta. III Reunión Interdisciplinaria de Tecnología y Procesos Químicos (RITeQ) (2014), Los Cocos, Córdoba, Argentina.

Capítulo 2

Descripción del sistema

2.1. Introducción

El Complejo Frutícola Argentino, ocupa el sexto lugar entre los diferentes complejos exportadores de Argentina, luego de las oleaginosas, petróleo-petroquímicas, cereales, automotriz y ganado bovino (Cabrerá, 2011).

Dentro de dicho complejo, la manzana y la pera explican el 50 % de las exportaciones totales (Preiss y Díaz, 2003). La pera ocupa el primer lugar de las frutas exportadas (33 % del total), mientras que la manzana ocupa el tercero (17 % del total) detrás del limón (Bevilacqua y Storti, 2011).

Por su parte, la principal región productora de estas frutas en Argentina se localiza en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén, ubicado mayoritariamente en la provincia de Río Negro y en la franja centro este de la provincia de Neuquén. Otras zonas de producción son el Valle Medio en la Provincia de Río Negro; 25 de Mayo, en la Pampa; Valle de Uco y zona sur de la provincia de Mendoza; y Valle del Tulum en San Juan (CAFI, 2010; Sánchez y Villarreal, 2012). En la Figura 2.1 se esquematiza la localización de estos complejos productivos.

Dado que en las provincias de Río Negro y Neuquén se encuentra más del 70 % de la superficie cultivada del país (53.500 hectáreas), se genera el 85 % de la producción y el 95 % de las exportaciones en fresco e industriales (Sánchez y Villarreal, 2012), hemos seleccionado esta región como caso de estudio para esta tesis, específicamente, el Alto Valle por ser la zona productora de manzanas y peras por excelencia.

En esta región, los comienzos de la actividad datan desde principios del siglo XX,



Figura 2.1 – Zonas productoras de fruta de pepita: 1. Valle del Tulum, San Juan; 2. Valle de Uco, Mendoza; 3. 25 de Mayo, La Pampa; 4. Alto Valle de Río Negro y Neuquén, Río Negro y Neuquén; 5. Valle Medio de Río Negro, Río Negro.

con la llegada del ferrocarril y la construcción de los primeros canales de riego. Hasta mediados de los '40, la comercialización de fruta estuvo a cargo exclusivamente de la Argentine Fruit Distributors, empresa inglesa fundada en 1928, subsidiaria de la compañía ferroviaria (Ferrocarril del Sud) (Leskovar, 2006).

Esta empresa organizó la recolección de la fruta en chacra y su envío a los centros de embalaje estratégicamente ubicados en las cercanías de las estaciones de tren. Una vez clasificada y embalada, la fruta era enviada por tren en furgones ventilados hasta Buenos Aires para su exportación al hemisferio norte (Sinclair y Coombs, 1999).

Posteriormente, a partir de la nacionalización de los ferrocarriles, firmas argentinas comienzan un proceso de integración de las etapas de empaquetado, comercialización y exportación. Desde los '60, dichas empresas se involucran también en el ámbito de la producción con lo que se completa la integración vertical (Zunino, 2008).

Entre los años '50 y '70, la construcción de la ruta nacional 22 agilizó el sistema de transporte en camión, permitiendo el auge frutícola en la región. Simultáneamente, en esta época se dio una fase de innovaciones técnicas, caracterizada por la mecani-

zación y la construcción masiva de frigoríficos, con la consecuente integración entre el empaquetado y la conservación de la fruta.

Un poco más tarde, a finales de los '70 y principio de los '80, se da una nueva etapa de transformación de la actividad gracias a la aparición de nuevos sistemas de conducción de las plantaciones –el término sistema de conducción se refiere a la estructura artificial hecha generalmente de palos y alambres que soporta y mantiene la mayor parte del armazón de la planta– y de cámaras frigoríficas de atmósfera controlada. Los primeros permitieron aumentar el número de plantas por hectárea, mientras que con las segundas se aumentó el período de conservación de la fruta.

Finalmente, en las últimas décadas los cambios más significativos se dieron por dos frentes diferentes, por un lado, la aparición de nuevas variedades, muchas de ellas clones de variedades clásicas, mejoradas principalmente en lo que respecta a características organolépticas y de conservación, por otro, los avances en tecnología electrónica y de gestión empresarial, principalmente en las etapas de clasificación, empaque y almacenamiento (Leskovar, 2006).

El presente capítulo proporciona información sobre la actividad frutícola relacionada con el negocio de la manzana y la pera con el objetivo de situar al lector en el contexto en el que se desarrolla la tesis. Toda la información presentada aquí fue obtenida mediante revisión bibliográfica y comunicación personal con agentes del sector.

2.2. Estructura productiva

El complejo productivo del sector está conformado por la producción primaria; la clasificación, el acondicionamiento y empaque de la fruta fresca; la conservación frigorífica; el transporte y la comercialización. La fruta que no cumple las exigencias del mercado en fresco es dedicada a la producción industrial de jugos concentrados y sidras principalmente (Figura 2.2).

2.2.1. Producción primaria

El primer eslabón de la cadena de valor de la manzana y la pera está constituido por las chacras en las que se encuentran las plantaciones frutales. Una de las principales características de este sector es la gran cantidad de mano de obra necesaria para poder llevar a cabo las actividades culturales en tiempo y forma. Claros indicadores de la importancia de este aspecto son que el 55 % del costo total de la producción es

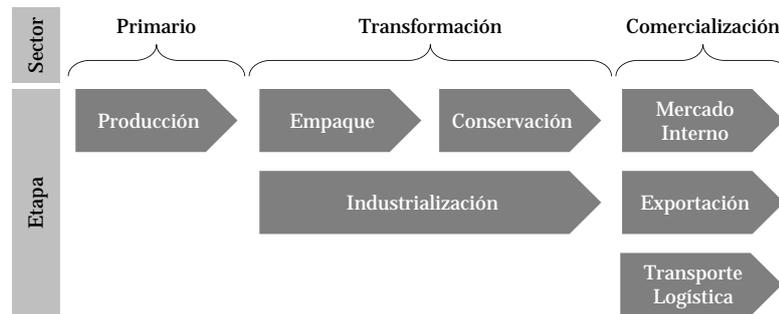


Figura 2.2 – Estructura del complejo frutícola de manzana y peras.

generado por esta componente (CAFI, 2008), y que la producción primaria concentra el 86 % del total de contrataciones del complejo (UIA, 2008). En las etapas de producción, empaque, conservación e industrialización de la manzana y la pera se emplean en forma directa a más de 70 mil personas. Durante la época de recolección de la fruta es cuando la demanda de mano de obra se intensifica, siendo cubierta en gran parte con empleos temporarios.

El período de cosecha comienza en enero, con las primeras variedades de pera –la William’s es una de ellas– y culmina en abril con las variedades tardías de manzana –como la Cripp’s Pink–. El calendario tentativo de cosecha, es definido por el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) en función del estado de madurez de la fruta y difiere según la variedad. Los productores y/o empacadores deben pedir autorización para iniciar la cosecha en las delegaciones zonales de dicho organismo (Bruzone, 2010). En la Figura 2.3 se presenta esquemáticamente el período de recolección característico de las principales variedades producidas en la región. Durante el resto del año, se realizan las labores culturales necesarias para mantener el cultivo en buen estado. En la Tabla 2.1 se muestran las principales labores culturales llevadas a cabo, y sus meses de realización.

Otra de las características propias de la producción de manzana y pera en chacras, es el alto nivel de inversión requerido, a lo que se suma que la producción de fruta se inicia recién después del cuarto año desde la implantación en los montes. Esto ha producido, como veremos más adelante, que muchos pequeños y medianos productores se vean imposibilitados de reconvertir sus plantaciones a variedades de mayor aceptación en el mercado, y paulatinamente vayan siendo desplazados del negocio por los productores con mayor capital.

En lo que respecta a cifras descriptivas del sector, de acuerdo a lo publicado en el Anuario estadístico 2012 por el SENASA (SENASA, 2012), cuya información

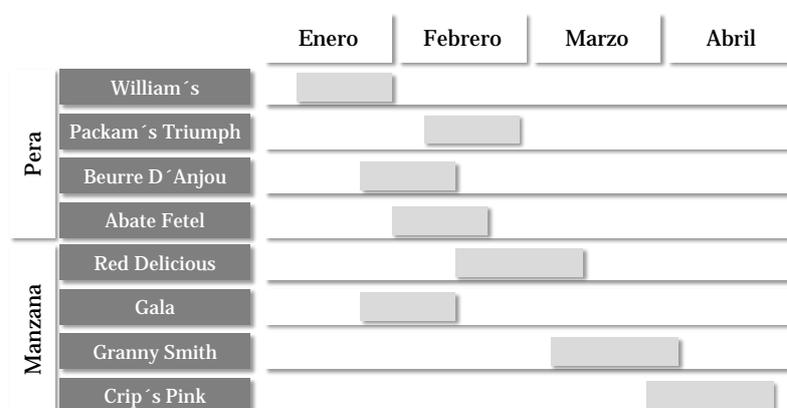


Figura 2.3 – Esquema del calendario de cosecha de las principales variedades del Alto Valle de Río Negro y Neuquén.

Tabla 2.1 – Calendario de labores culturales.

Tareas Culturales	Meses											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Poda						×	×					
Limpieza de acequias							×					
Control de plagas y enfermedades	×	×	×					×	×	×	×	×
Laboreo del suelo y control de malezas	×							×	×		×	
Riego	×	×	×						×	×	×	×
Fertilización								×		×		
Colocación y retiro de colmenas									×	×		
Raleo												×
Cosecha	×	×	×	×								
Plantación						×						

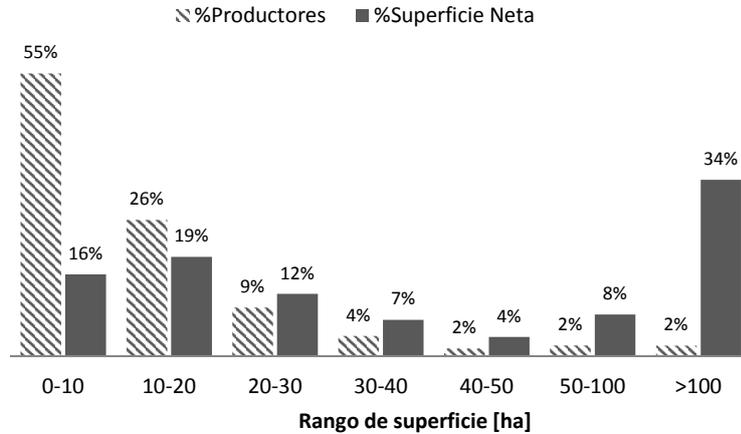


Figura 2.4 – Distribución de productores y superficie total por tamaño de los establecimientos productivos (SENASA, 2012).

surge del Registro Nacional Sanitario de Productores Agropecuarios (RENSPA), la superficie total con frutales de pepita en el Norte de la Patagonia Argentina es de 46.754 ha, de las cuales el 85 % se encuentran en la provincia de Río Negro. Por su parte, la participación entre especies, peras y manzanas, es similar (Ver Figura 2.6b).

La producción frutícola de Río Negro y Neuquén es llevada a cabo por unos 2600 productores en 4500 establecimientos aproximadamente (SENASA, 2012). Es necesario destacar sin embargo que el complejo presenta altos grados de concentración. La Figura 2.4 muestra la distribución por estratos de cantidad de productores y superficie neta de plantaciones. Por un lado, un 2 % de los productores primarios con más de 100 hectáreas concentran el 34 % de la superficie cultivada neta, mientras que en el otro extremo, un 55 % de los productores posee menos de 10 hectáreas, ocupando 16 % de la superficie total (SENASA, 2012).

Evolución de las plantaciones

Con el correr del tiempo tanto los sistemas de conducción como la distancia de plantación han ido cambiando. La primera etapa de la fruticultura, desde 1930 hasta 1970 aproximadamente, estuvo caracterizada por montes de baja densidad –entre 150 y 350 plantas por hectárea– y en conducción libre.

A partir de la década del '70, se comienza a utilizar un nuevo sistema de conducción “en palmeta”, el cual cuenta con una estructura de apoyo formada con postes y alambre conocida como espaldera. Paralelamente aumentan la densidad de planta-

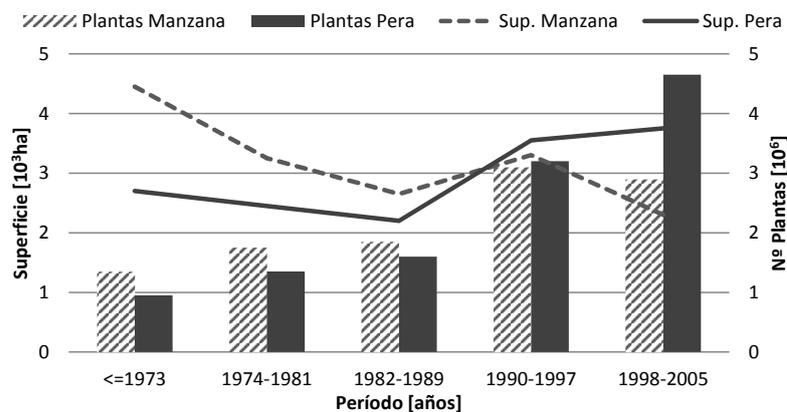


Figura 2.5 – Variación en el tiempo de las inversiones en nuevas plantaciones por especie expresado en superficie y número de plantas (Alvarez y otros, 2000).

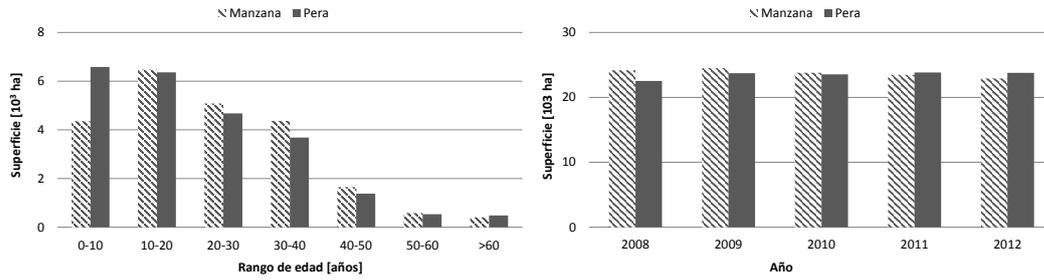
ción hasta 625 plantas por hectárea.

Desde mediados de la década del '80 en adelante, la tendencia de aumentar las densidades de plantación se mantiene, alcanzando a superar las 2.000 plantas por hectárea. Simultáneamente se comienza a trabajar con una nueva forma de conducción en “eje central” con ramas en forma radial, manteniendo la estructura de apoyo (Alvarez y otros, 2000).

Como resultado de este proceso, se observa un paulatino aumento de la densidad de plantación promedio en la región. Un informe elaborado por la Secretaría de Fruticultura de Río Negro (Avellá y Marcelo, 2009), muestra cómo han ido cambiando las decisiones de inversión en el Alto Valle de Río Negro con el correr de los años (Figura 2.5). El hecho de que la cantidad de superficie implantada disminuya, pero aumente la cantidad de plantas responde al aumento de densidad de plantación mencionado.

También la Figura 2.5 muestra que a partir de la década del '90 los productores se han inclinado por invertir en mayor medida en plantaciones de peras en detrimento de las de manzana. Más adelante ahondaremos en las causas que motivaron este proceso de reconversión hacia la pera.

Esta inclinación por parte de los productores, se ha extendido hasta la actualidad y sus efectos pueden verse reflejados en la distribución etaria de la superficie de ambos frutales en el año 2012 (Figura 2.6a), donde la superficie ocupada por plantaciones jóvenes de pera supera a la ocupada por plantaciones de manzana. También como resultado de esta tendencia, en el año 2011 la superficie cultivada con plantaciones



(a) Distribución etaria de las plantaciones de manzana y pera en Río Negro y Neuquén. (b) Evolución de la superficie ocupada por plantaciones de manzanas y peras en los últimos años.

Figura 2.6 – Características de la superficie con plantaciones de frutales de pepita en la provincia de Río Negro y Neuquén (SENASA, 2012).

de pera superó a la de manzana por primera vez en nuestro país (Figura 2.6b).

Así como los métodos de conducción y las densidades han cambiado en el primer eslabón de la cadena, también lo hicieron los gustos de los consumidores en el otro extremo de la misma. Por consiguiente, los productores han tenido que adaptarse modificando las variedades incluidas dentro de su estructura productiva.

Las variedades más comunes que corresponden a la primera y segunda etapa de la fruticultura en nuestro país son:

- En manzanos: Red Delicious, Granny Smith y Golden Delicious.
- En perales: William's, D'Anjou y Packam's Triumph.

Por su parte, en la última etapa se han incorporado:

- En manzanos: nuevos clones mejorados de Red Delicious, clones mejorados de Gala, Cripp's Pink, Braeburn y Fuji.
- En perales: clones de red Bartlett mejorados como Sensation, clones rojos de D'Anjou, Abate Fetel.

El complejo productivo del Alto Valle en la actualidad está conformado por una combinación de las variedades mencionadas, con preponderancia aún de las estructuras propias de la primera y segunda etapa, tal como se puede observar en la Figura 2.7 donde se reporta, por variedad, la distribución etaria de las plantaciones existentes.

De la información presentada en la Figura 2.7 se obtiene la distribución de variedades en la actualidad, presentada en la Tabla 2.2.

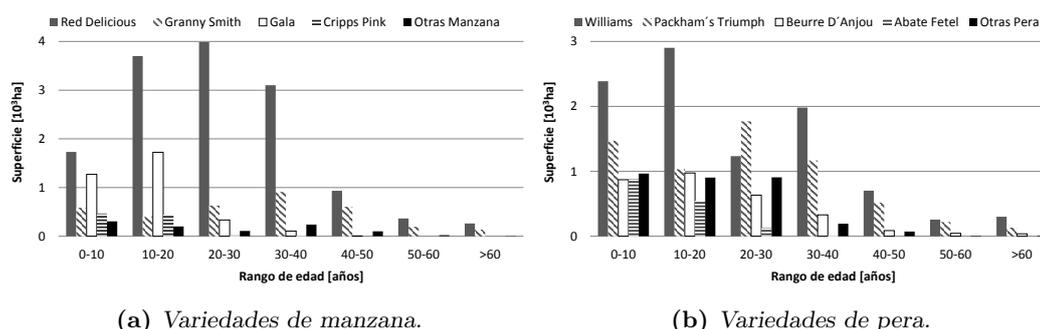


Figura 2.7 – Distribución etaria de las plantaciones de las principales variedades de manzana y pera en las provincias de Río Negro y Neuquén (SENASA, 2012).

Tabla 2.2 – Superficie ocupada y composición porcentual de las distintas variedades de manzana y pera en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén (Fuente: Elaboración propia en base a SENASA (2012)).

Variedad	Superficie (ha)	Composición (%)
Red Delicious	14082	30.2
Granny Smith	3468	7.4
Gala	3441	7.4
Cripp's Pink	947	2.0
Otras manzana	983	2.1
William's	9764	20.9
Packam's Triumph	6320	13.6
Beurre D'Anjou	2978	6.4
Abate Fetel	1580	3.4
Otras pera	3058	6.6

2.2.2. Clasificación y empaque

La fruta recolectada en las chacras es transportada en cajones (o bins, por su designación en inglés) con una capacidad de 350 o 450 kg, por medio de camiones hasta la planta de empaque.

Una vez allí, se identifica la partida recepcionada registrando el nombre del productor, la variedad, fecha de cosecha y peso. A continuación, los bins se van apilando para ser trabajados posteriormente.

La fruta que ingresa a las líneas de clasificación puede provenir de las chacras, o bien de cámaras frigoríficas en caso de que se haya decidido conveniente almacenarla previamente. A continuación, a modo de ejemplo, se describe la operación de una línea de empaque con sistema tradicional (Aqueveque y otros, 2000).

El proceso comienza con la descarga de la fruta. Para esto, los bins son transportados hasta la zona de ingreso de la máquina y se los ubica en una volcadora mecánica, o bien en un hidroiñmensor, dependiendo de la tecnología disponible. La volcadora mecánica inclina los bins directamente a la mesa de clasificación, mientras que en el hidroiñmensor los bins son colocados en una pileta con agua y la fruta se traslada por flotación. Este último, forma parte de un sistema más avanzado y elimina los riesgos de dañar la fruta con golpes.

La siguiente etapa corresponde al pretamaño, donde se elimina la fruta de tamaño pequeño. El proceso consiste en pasar la fruta sobre una malla de alambre a través de la cual cae la de tamaño inferior al orificio de la malla. Este método no es utilizado con peras, ya que el fruto puede sufrir lesiones. Aquí también se realiza una preclasificación en la que se descarta la fruta lesionada o deformada, la cual se destina a industria.

Posteriormente se procede a la limpieza de la fruta. El mismo puede ser realizado a través de dos métodos diferentes: seco y húmedo. El primero se realiza por medio de cepillos de cerda suave, con los que se elimina la tierra, restos de insecticida y otras impurezas. El segundo, más moderno, está generalmente precedido por la hidroiñmersión y consiste en un lavado, enjuague, tratamiento anti-moho y anti-escaldante, escurrido y secado. En el caso de las manzanas, aquí se efectúa también un encerado opcional.

Una vez finalizada la limpieza, se procede a la selección de la fruta de acuerdo a su calidad. Este proceso, en el sistema tradicional, se realiza en forma manual, donde se elimina la fruta golpeada y se clasifica la restante. Los parámetros observados en esta etapa por los operarios son: porcentaje de cobertura de color, ausencia de defectos, daños por insectos, etc. De esta forma surgen tres calidades: elegida, comercial y común.

La última etapa de la clasificación de la fruta consiste en separarla de acuerdo a su calibre. Esto se logra con el uso de un transportador que contiene balancines. Los mismos se gradúan de forma tal que la fruta más pesada caiga al comienzo de la línea y la más liviana al final.

Finalizado el proceso de clasificación, la fruta se dirige a tambores giratorios, donde operarios la reciben y la alojan dentro de distintos envases, utilizando accesorios como papeles y bandejas. El tipo de envase utilizado depende básicamente del mercado de destino: ultramar (UE, Rusia, USA, etc.), mercado interno y/o Brasil¹. El

¹Información detallada de los envases utilizados para los distintos mercados, puede encontrarse

objetivo del envasado es permitir una mejor manipulación de la fruta en el proceso de comercialización, fundamentalmente buscando evitar golpes, los cuales se evidencian en la superficie restándole valor comercial y/o incrementando las mermas. Con el mismo objetivo, los envases se apilan y disponen sobre palets².

Las principales innovaciones tecnológicas en el sector de clasificación y empaque son (Leskovar, 2006):

- tamañadora y clasificadora electrónica: la selección se realiza a través de un selector de color electrónico, que toma el porcentaje de color verde o rojo del fruto, dependiendo de la variedad con la que se trabaje. Se realiza también el tamañado mediante balanzas electrónicas controladas por computadora.
- llenadora automática de bins: consta de canales con corriente de agua, compuertas y plataformas giratorias con bins.
- apilador automático de bins: es un dispositivo mecánico que permite el desapilado, hidroyersión, transporte y relleno automático de bins.
- llenadoras semiautomaticas de bandejas: la línea de producción es alimentada con fruta clasificada, frigorizada en bins, relavada y depositada en bandejas de pulpa premoldeada.
- romaneo electrónico: permite realizar un control y registro computacional del volumen de fruta de cada calidad y tamaño.
- Otras mejoras incluyen la incorporación de rodillos de goma o felpa en las etapas de lavado y cepillado.

De acuerdo a la información presentada por el SENASA (2012) en la región hay unos 246 galpones de empaque (232 en Río Negro y 14 en Neuquén), de los cuáles 180 están habilitados para exportar. Los restantes 66 sólo pueden comercializar fruta en el mercado interno. Los empaques habilitados para exportar suman una capacidad de procesamiento de 12.812 toneladas de fruta por turno de 8 horas.

en Giunta y otros (1994).

²Un pallet, palet, palé (único término reconocido por la Real Academia Española) es un armazón, generalmente de madera, empleado en el transporte de carga. Normalmente en la industria se habla de paletizar los envases. La medida más utilizada en el transporte y almacenamiento de productos de consumo es de 1200x800 mm.

2.2.3. Conservación frigorífica

La fruta puede ser almacenada en cámaras frigoríficas antes y después de ser clasificada. El desarrollo de las tecnologías de frío, han tenido un gran impacto sobre todo en la organización del trabajo industrial. Permite, entre otras cosas, atenuar la característica estacional de la actividad; regular la oferta de fruta para poder obtener mejores precios de venta; regular la producción del galpón de empaque; mitigar eventuales problemas de sobreproducción, falta de insumos y conflictos laborales en las plantas.

Los sistemas de conservación más comúnmente utilizados son: el preenfriado, cámaras de frío convencional, y cámaras de atmósfera controlada (Leskovar, 2006).

Preenfriado Los túneles de preenfriado son utilizados para disminuir la temperatura de la fruta antes de su ingreso a las cámaras frigoríficas. Consiste en quitar rápidamente el calor sensible o de campo que puede traer el fruto. De esta forma se mejora la eficiencia posterior del uso del frío. Se conocen dos métodos de preenfriado, con aire forzado y el hidrogenfriado. En el primero básicamente se circula aire frío por medio de ventiladores a través de los contenedores. Por su parte, el hidrogenfriado consiste en hacer pasar agua fría de forma tal que entre en contacto con cada pieza individual del producto. Se puede aplicar en forma de lluvia o por inmersión.

Frío convencional En este sistema de conservación se regula temperatura, humedad y velocidad del aire. Mediante la utilización de bajas temperaturas se busca atenuar el ritmo respiratorio de los frutos, la pérdida de agua y el desarrollo microbiano, de forma tal de alargar su vida poscosecha.

Atmósfera controlada además de poseer las características técnicas del sistema anterior, controla los niveles de O_2 y el CO_2 con el fin de disminuir la respiración del fruto retardando su maduración. También posee la ventaja de que al retardar la velocidad de respiración por la eliminación de los gases, permite almacenar la fruta a una temperatura más elevada, eliminando los riesgos de daño por congelación en la manzana. Los períodos de conservación de la fruta con esta tecnología son superiores a los correspondientes con cámaras de frío convencional.

Es necesario destacar también que la calidad de conservación difiere de una variedad a otra, presentando la manzana en general una mejor adaptación a las distintas tecnologías de conservación en cuanto al mantenimiento de sus características de

calidad respecto de la pera.

En lo que respecta a cifras del sector, en [SENASA \(2012\)](#) se reporta que hay un total de 235 establecimientos frigoríficos (210 en Río Negro y 25 en Neuquén), cuya capacidad instalada de atmósfera convencional es de 649.411 toneladas y 288.886 toneladas en atmósfera controlada.

2.2.4. Industrialización

Como se mencionó anteriormente, la fruta no destinada al consumo en fresco es industrializada. El descarte ronda el 40 % –ha llegado incluso al 50 %– de la producción total en manzanas, superando el nivel promedio de los países del hemisferio sur (30 % según [USDA, 2013](#)), en tanto que en pera no supera el 25 % ([Villarreal y otros, 2011](#)). En 2012 562 mil toneladas de fruta tuvieron como destino a la industria. Unas 320 mil toneladas correspondieron a manzana y las restantes 242 mil a pera ([Funbapa, 2013](#)).

De la manzana enviada a industria, un 88 % es utilizada para la producción de jugo concentrado, un 10 % para caldo de sidra y sidra, y un 2 % se reparte entre deshidratados, conservas y otros. Por su parte, la industrialización de la pera también tiene como principal actividad la elaboración de jugo concentrado, que absorbe el 70 % del volumen, le sigue en importancia la conserva, y en volúmenes menores deshidratados, dulces y sidra ([Zubeldía, 2007](#)).

Dada la relevancia que el jugo concentrado alcanza dentro del sector de industrialización de la fruta, nos centraremos en este producto en lo que resta de la sección. El jugo concentrado constituye un commodity de bajo valor agregado que se vende mayormente a granel para ser utilizado como insumo por otras industrias alimenticias. En particular, se lo emplea como endulzante en la fabricación de bebidas gaseosas ([Bevilacqua y Storti, 2011](#)).

Tradicionalmente la producción de jugo concentrado ha tenido como destino la exportación (98 % del total). El mercado principal del jugo concentrado es Estados Unidos. De hecho, hasta hace unos años era prácticamente el único destino. En lo que respecta a la demanda de este mercado, hasta el año 2008 mantuvo una tendencia creciente. Sin embargo, en las últimas temporadas se redujo por efecto de la crisis internacional y la irrupción de China que actualmente domina el mercado ([Figura 2.8](#)). En general la demanda de este país está orientada al jugo concentrado de manzana, siéndole de menor interés el de peras, que tiene un menor valor ([Villarreal](#)

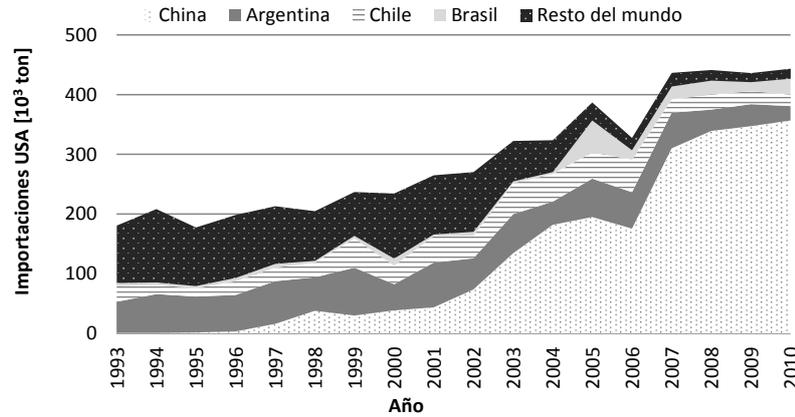


Figura 2.8 – Importaciones por país en miles de toneladas de jugo concentrado de manzana en Estados Unidos. Fuente: U.S. Department of Commerce, U.S. Census Bureau.

y otros, 2011).

Fruto de la contracción mencionada de la demanda del mercado norteamericano, los productores locales de jugo concentrado se vieron forzados a buscar nuevos destinos para su producto. A partir del 2010 se abrieron nuevos mercados para la comercialización de jugo concentrado argentino. Holanda, Japón y México demandaron cada uno un 3% de las exportaciones, mientras que a Canadá se destinó un 4%. De esta forma se redujo el porcentaje enviado a Estados Unidos de un 98% a un 87%. Otro dato positivo en este sentido, es que el volumen comercializado en el mercado interno en los últimos años ha crecido, principalmente debido a la aparición de las aguas saborizadas (Ablin, 2011).

Argentina ocupa el quinto puesto como productor, y el cuarto como exportador a nivel mundial de jugo concentrado de manzana –concentra el 10% del comercio mundial–, posicionándose como líder en este apartado en el Hemisferio Sur (Ablin, 2011).

La capacidad de producción instalada en la provincia de Río Negro es de 100.000 toneladas anuales. Sin embargo, al tratarse de una actividad altamente estacional, hay mucha capacidad ociosa a lo largo del año (Bruzone, 2010).

2.2.5. Comercialización - mercados

La comercialización de la fruta fresca puede tener, a grandes rasgos, tres destinos diferentes. Los dos primeros definen lo que es la comercialización de exportación, y el restante es la comercialización llevada a cabo para abastecer el consumo interno

de fruta fresca.

Entre los mercados de exportación se pueden distinguir los mercados de ultramar y los regionales. En los primeros, la fruta llega a destino a través de transporte marítimo. Estos mercados se caracterizan por ser del Hemisferio Norte y demandan la fruta argentina en contraestación, época del año en la que su producción es nula. Los segundos están conformados por países de la región, la fruta es transportada por vía terrestre y demandada durante todo el año.

A continuación, mencionaremos los principales exponentes de cada uno de ellos junto con una descripción de sus características.

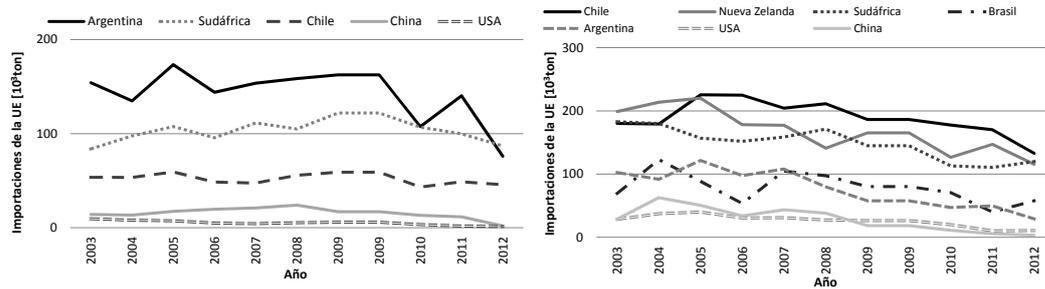
- **Ultramar:** Unión Europea, Rusia y Estados Unidos.
- **Regional:** Brasil.
- **Mercado Interno**

Unión Europea (UE)

La UE es un mercado importante tanto para la pera, como para la manzana argentina. De hecho, constituye el principal destino de las exportaciones de ambas especies (Funbapa, 2013).

Para la UE, Argentina y Sudáfrica son los principales proveedores de pera (Figura 2.9a). En conjunto representan aproximadamente el 75% del total de peras importadas por dicho mercado. El tercer puesto es ocupado por Chile, seguido por China y USA. En lo que respecta a manzanas, es abastecido principalmente por Chile, Nueva Zelanda y Sudáfrica. Le siguen en importancia Brasil y Argentina (Figura 2.9b). Cierran el grupo de los principales proveedores USA y China. Estos países constituyen los competidores de Argentina en contraestación. En el caso de la pera, también compite con la Abate Fetel italiana que puede quedar en frío de la temporada anterior (Secretaría de Fruticultura de Río Negro, 2007).

Las principales variedades de pera comercializadas son William's, Packam's Triumph, Abate Fetel y D'Anjou. En manzana, son la Gala y la Cripp's Pink. La Red Delicious y Granny Smith resultan cada vez más difíciles de colocar en este mercado debido a la preferencia de los consumidores por las variedades bicoloradas. Las ventas que aún se realizan de estas variedades son principalmente a Holanda para la posterior salida a Rusia.



(a) Importaciones de pera (*Groupe de travail Prévisions Poires, 2013*). (b) Importaciones de manzana (*Groupe de travail Prévisions Pommés, 2013*).

Figura 2.9 – Evolución de las importaciones de pera y manzana por países en la UE. Período 2003-2012.

Rusia

Rusia es el mayor importador de frutas del mundo y su demanda viene creciendo año a año, fortalecido por su apertura comercial, la mejora de su economía y el mayor poder adquisitivo de la población, favorecido por los precios de petróleo y gas con los que proveen a toda Europa (*Secretaría de Fruticultura de Río Negro, 2007*).

El principal proveedor de manzanas de Rusia es la UE, con más del 40 %, seguido por China con el 20 %. Argentina abastece el 7 % del mercado y domina la oferta del Hemisferio Sur. La UE también es el principal proveedor de pera con el 52 % seguido por Argentina con el 24 %.

En Rusia, los principales competidores de Argentina en contraestación son Chile y Sudáfrica. Por su parte, los stocks remanentes de la temporada anterior de los países europeos y de China, en el caso de la manzana, también pueden afectar la demanda de la fruta del Hemisferio Sur en contraestación.

Las principales variedades de pera comercializadas en este mercado por parte de Argentina son la William's y la Packam's Triumph. En cuanto a las manzanas, tanto la Red Delicious como la Granny Smith son las más demandadas.

En los últimos años, Rusia ha incrementado significativamente la demanda de la pera y la manzana Argentina (Figura 2.10). Este incremento se dio sobre todo a partir del año 2000, y se vio favorecido por la combinación de dos factores. Por un lado, el crecimiento de la economía rusa que derivó en un aumento de sus importaciones. Por otro, Argentina tuvo que buscar mercados alternativos a la producción de manzanas que se destinaban a Brasil, cuya demanda fue afectada por la crisis que atravesaba en esa época. En Rusia, nuestro país ha encontrado una oportunidad

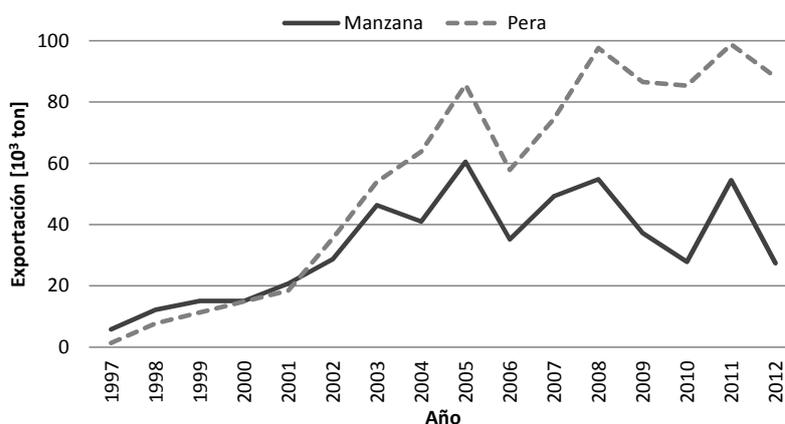


Figura 2.10 – Evolución de las exportaciones argentinas de manzana y pera a Rusia. Elaboración propia en base a información de FunbaPa.

comercial importante debido a que los consumidores rusos demandan las variedades de manzana tradicionales argentinas, Red Delicious y Granny Smith, cada vez más resistidas en el resto de los mercados de ultramar (González Luque, 2008).

Estados Unidos (USA)

USA es uno de los principales productores del mundo tanto de manzana como de pera, ocupa el tercer y cuarto puesto en el orden mundial respectivamente (USDA, 2013). Si bien almacena fruta todo el año para atender la demanda interna, en contra estación debe importar para complementar el stock propio.

En particular, USA representa un destino importante en las exportaciones de pera argentina. El 44 % de las importaciones de pera en este mercado provienen de nuestro país. Las variedades que se comercializan son William's y en menor medida Packam's. El resto de la demanda de esta especie es cubierto por Chile, China y Nueva Zelanda (Secretaría de Fruticultura de Río Negro, 2007).

A diferencia de lo que ocurre con las peras, USA no constituye un mercado importante para las manzanas Argentinas, ya que en nuestro país no se producen las variedades demandadas allí. Argentina sólo aporta el 3 % de las importaciones de manzana norteamericanas. Las variedades comercializadas son la Gala y la Granny Smith. Por su parte, Chile provee el 58 % de las manzanas importadas en dicho país, seguido por Nueva Zelanda con un 23 % (González Luque, 2008).

Brasil

Argentina es el principal proveedor de fruta de pepita de Brasil. La participación en este mercado se ha mantenido en valores cercanos al 80 %. Una de las características de este mercado de exportación que lo diferencia de los anteriormente descritos es que demanda fruta argentina todo el año.

Brasil tiene una producción de peras muy limitada, por lo que el consumo debe ser abastecido mayormente por las importaciones. De hecho, es el tercer importador de peras del mundo, detrás de Rusia y la Unión Europea (USDA, 2013). Para la Argentina representa un mercado de exportación importante. Tal es así que en 2012 casi el 40 % de las exportaciones totales de dicha especie tuvieron como destino a Brasil (Funbapa, 2013). Las variedades comercializadas en este mercado son principalmente William's de enero a mayo, y posteriormente la Packam's. Los principales competidores son Chile del Hemisferio Sur; y USA y Portugal del Hemisferio Norte.

Por su parte, el mercado de manzana brasilero es abastecido principalmente por la oferta nacional. Sin embargo, con su producción no alcanza a cubrir la totalidad de la oferta por lo que debe importar cierto volumen, sobre todo en el segundo semestre del año. Argentina es el principal proveedor con la variedad Red Delicious, junto con Chile (Secretaría de Fruticultura de Río Negro, 2007). Para la Argentina el mercado de Brasil representa aproximadamente un 25 % de las exportaciones de manzana (Funbapa, 2013).

Mercado interno

En la Argentina se consumen en promedio 8 kg de manzana y 2,5 kg de pera por habitante por año (Bruzone, 2010). A pesar de ser valores relativamente bajos (por ejemplo en la UE se consumen unos 25 kg de manzana y 5 kg de pera por habitante por año (Salvador y Lamfre, 2012)), son escasas las campañas de promoción realizadas para incrementar el consumo.

La variedad de manzana preferida en el mercado interno es la Red Delicious y sus clones de mayor cobertura de color, que constituyen cerca del 80 % del consumo. Le siguen en importancia la Granny Smith con un poco más del 11 % de participación y la Gala con un 8 % aproximadamente (Funbapa, 2013). En el caso de la pera, las variedades más consumidas son William's con un 56 % de representatividad y Packam's con un 37 % (Funbapa, 2013). Se observa que los gustos y preferencias del mercado interno se corresponden con las variedades de mayor producción en el país.

En el caso de las manzanas, este comportamiento es justamente el opuesto al que presenta el mercado internacional donde, como se dijo anteriormente, resulta cada vez más difícil colocar estas variedades.

En cuanto a los canales de comercialización, un 25 % se canaliza a través del Mercado Central de Buenos Aires, que a pesar de que ha ido perdiendo relevancia con el correr de los años, todavía es considerado como formador de precios. Por su parte, otros mercados del interior del país han aumentado su participación, tales como Córdoba, Mendoza, Tucumán y Rosario (Bruzzone, 2010).

Otro de los aspectos que ha caracterizado la evolución del mercado doméstico en el último tiempo es el aumento de las ventas directas a supermercados e hipermercados. Simultáneamente, han aumentado las exigencias de calidad en general por parte de los distribuidores minoristas.

2.2.6. Comercialización - transporte

La fruta comercializada en el mercado interno y en Brasil es transportada por vía terrestre. Para el primer caso, se utilizan camiones térmicos o con control de temperatura. Cada uno carga 1.000 cajas (20,4 toneladas), equivalente a 20 pallets. En algunos casos, los camiones utilizados no tienen control de temperatura, lo que hace que la fruta pueda sufrir deterioros en su calidad (Bruzzone, 2010).

La fruta destinada a Brasil se transporta en camiones adecuadamente refrigerados, de mayor capacidad que los empleados para transporte interno (1.200 cajas-22,8 toneladas). En este caso, el servicio de transporte está fuertemente tercerizado, con mayoría de empresas brasileñas.

Finalmente, la fruta comercializada en ultramar una vez que sale de los galpones de empaque es enviada a puerto en los mismos camiones que se utilizan para abastecer al mercado interno. Una vez allí, se utilizan distintas modalidades de almacenamiento para transporte marítimo. Se puede mencionar los contenedores TEU 20', los cuales cargan 10 pallets, y los FEU 40', en los que caben 20 pallets. La bodega es otra modalidad comúnmente utilizada. En cada bodega entran unos 400 pallets.

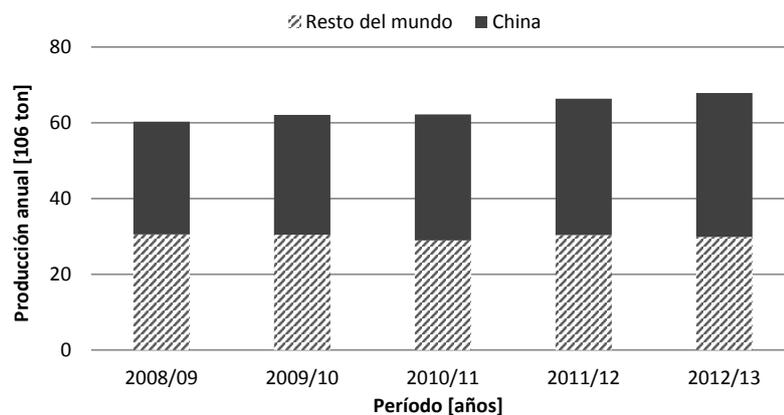


Figura 2.11 – Producción anual de manzanas en el mundo con y sin China.

2.3. Contexto internacional de la comercialización de manzana y pera fresca

En este apartado se incluyen cifras de los principales exponentes en el comercio mundial de manzanas y peras, distinguiendo entre productores, exportadores e importadores.

2.3.1. Principales exponentes en manzana

La producción mundial de manzanas en la temporada 2012/2013 fue de 67.8 millones de toneladas. En el período 2008/09 - 2012/13 se registró un crecimiento de aproximadamente un 12.5% (USDA, 2013). Más de la mitad de la producción mundial corresponde a China, la cual en el mismo período pasó de una producción de 28.4 a 38 millones de toneladas, explicando así casi la totalidad del aumento de la producción mundial (Figura 2.11) (USDA, 2013).

Del total de manzana producida, el 71% se consume en los países de origen, el 14% se comercializa entre países (exportación - importación) y el 15% restante es dedicado a industria (USDA, 2013).

Además de China, se destacan como los principales productores de manzana fresca la UE (11.2 millones de toneladas), USA (4.2 millones de toneladas), Turquía (2.9 millones de toneladas) e India (1.8 millones de toneladas). En el período 2012/13 Argentina ocupó el décimo lugar como productor mundial (USDA, 2013).

En el mercado de exportación, los países con mayor incidencia son: UE (1.5 millones de toneladas), China (1.1 millones de toneladas), USA (0.9 millones de toneladas)

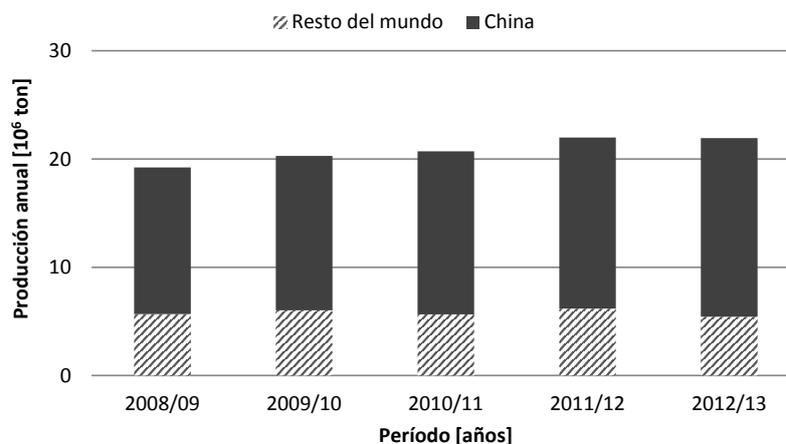


Figura 2.12 – Producción anual de peras en el mundo con y sin China.

y Chile (0.7 millones de toneladas). Argentina ocupa el puesto número 7 (USDA, 2013).

Los principales países importadores de manzana son: Rusia (1.3 millones de toneladas), UE (0.5 millones de toneladas), México (0.3 millones de toneladas) y Canadá (0.2 millones de toneladas) (USDA, 2013).

2.3.2. Principales exponentes en pera

El volumen de producción mundial de peras para 2012/13 fue de 22 millones de toneladas, mostrando un incremento de un 14 % con respecto al período 2008/09. El 75 % de la producción corresponde a China. Como se ve en la Figura 2.12, nuevamente China es el principal responsable del aumento de la producción mundial, al pasar de producir 13.5 millones de toneladas a 16.5 millones en el período considerado (USDA, 2013).

A China, le siguieron como productores en 2012/2013 la UE con 2.11 millones de toneladas, Argentina con 0.82 millones de toneladas y USA con 0.80 millones de toneladas (USDA, 2013).

En dicho período, el 77 % de la producción total de pera fue destinada a consumo en origen, 13 % al comercio entre naciones (exportación - importación) y el 10 % a industria (USDA, 2013).

Argentina es el principal exportador de peras con 0.45 millones de toneladas en 2012/2013, le siguió China con 0.43 millones de toneladas y la UE con 0.35 millones de toneladas (USDA, 2013). El primer puesto en la exportación de peras ha sido

disputado entre Argentina y China durante los últimos 5 años. Previo a este período Argentina lideraba con comodidad este rubro.

No obstante, hay que aclarar que las peras chinas no compiten en forma directa con las argentinas debido a que son frutos de especies distintas (peras asiáticas en China y peras europeas en Argentina) y tienen como destino mercados diferentes. Las peras asiáticas se comercializan principalmente en el este de Rusia y países asiáticos, mientras que las europeas se posicionan en el occidente de Rusia, países europeos y del continente americano (González Luque, 2008).

Por su parte, Rusia es el principal importador de pera con un volumen de 0.35 millones de toneladas, seguido por la UE con 0.24 millones de toneladas y Brasil con 0.20 millones de toneladas (USDA, 2013).

2.3.3. Argentina en el mundo de la manzana y la pera

En 2012, la producción regional fue de 685 mil toneladas de manzana y de 705 mil toneladas de pera (Fumbapa, 2013). Al analizar la evolución de los niveles de producción de ambas especies (Figura 2.13a), se observa que gradualmente la manzana ha ido perdiendo participación con respecto a la pera. En el año 2012 la producción de pera fue superior a la de manzana, y se espera que en los próximos años esta diferencia aumente, debido principalmente a que, desde el año 2011, la superficie con plantaciones de pera es mayor a la ocupada con plantaciones de manzana.

Si se observan los destinos que ha tenido tanto la producción de manzana como de pera (Figuras 2.13b y 2.13c, respectivamente), se evidencia que ambas especies transitan caminos muy diferentes. Por un lado, la manzana muestra una clara dificultad para insertarse en los mercados de exportación y que un elevado porcentaje de su producción no encuentra lugar en el mercado de la fruta fresca y es procesado en la industria. Por otro, la pera ha logrado posicionarse en los mercados de exportación, por lo que el aumento de los niveles de producción ha ido acompañado por un aumento en los volúmenes exportados. En lo que respecta al volumen comercializado en el mercado interno, se ha mantenido estable para ambas especies. Esta situación explica en parte por qué la región ha optado por reconvertir hacia variedades de pera.

En este punto, es necesario preguntarse si los principales competidores de Argentina del Hemisferio Sur –Chile, Sudáfrica, Nueva Zelanda– están atravesando el mismo escenario, sobre todo en lo que concierne a la dificultad de inserción de la manzana

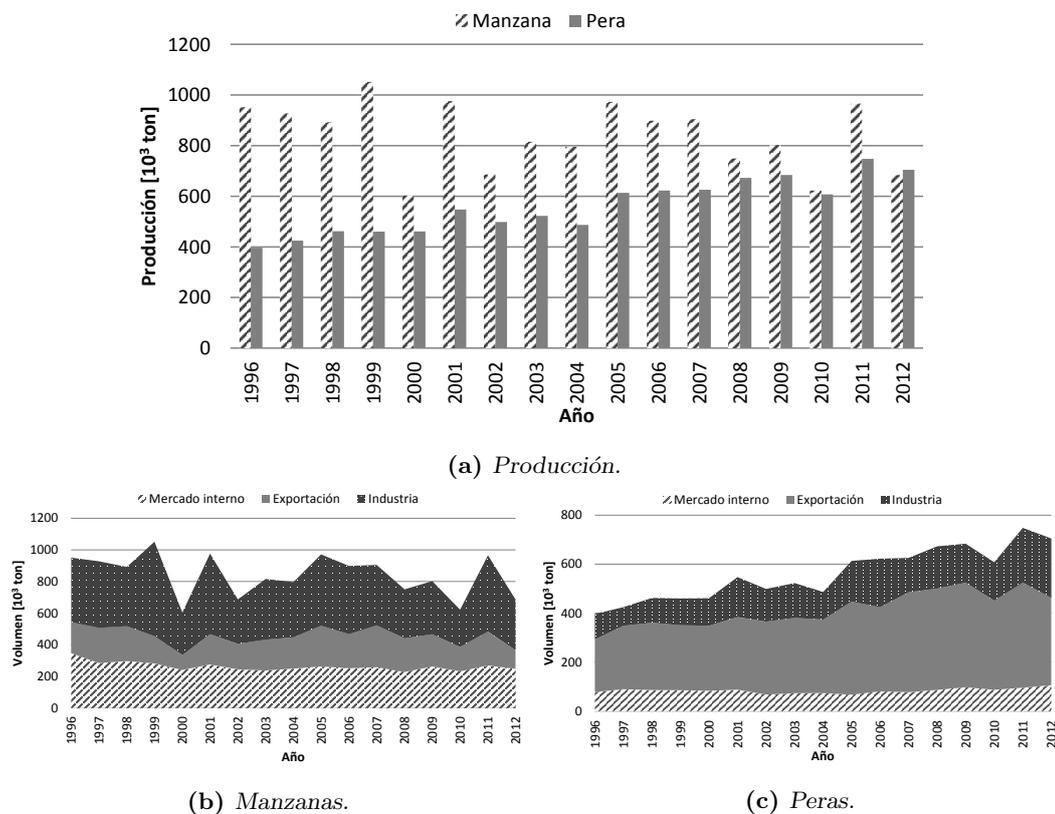


Figura 2.13 – Evolución del volumen y destino de la producción de las manzanas y peras en Argentina.

en el mercado internacional.

En la Figura 2.14 se presenta la evolución de las exportaciones de manzanas y peras de Argentina versus las del Hemisferio Sur. El hecho de que el resto de los productores del Hemisferio Sur hayan podido aumentar el volumen de sus exportaciones de manzana, sugiere que el problema del desempeño exportador de la manzana argentina se encuentra fronteras adentro del país y no es una cuestión de contracción de la demanda mundial. Esto último es una conclusión importante, dado que indica que existen posibilidades de mejora para retomar el liderazgo que una vez supo tener³.

En Preiss y Díaz (2003) se ha analizado esta situación, y para dar explicación a las razones que motivan esta disparidad han distinguido entre *ventajas estáticas* y *dinámicas*. Las primeras están relacionadas, en nuestro caso, a las capacidades productivas inherentes de la región (suelo, clima, etc.), mientras que las segundas se encuentran asociadas a todas aquellas acciones realizadas para destacar el producto

³Hasta comienzos de la década del '80 Argentina era el principal exportador de manzanas del Hemisferio Sur

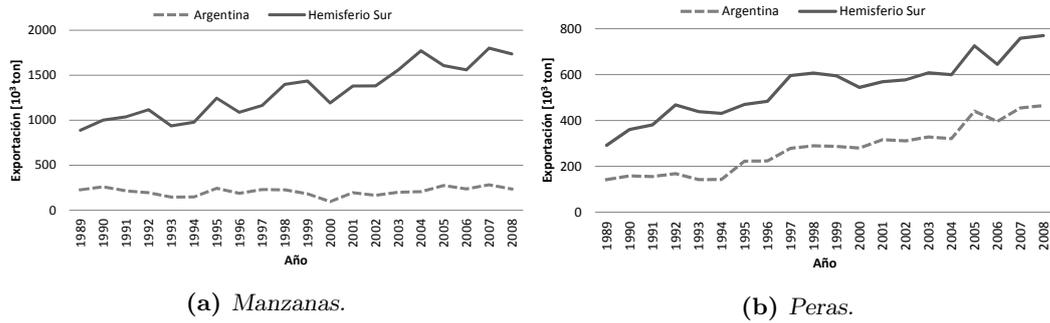


Figura 2.14 – Comparación entre las exportaciones de Argentina y del Hemisferio Sur.

propio del de los competidores. Las ventajas estáticas son suficientes, en general, cuando la demanda supera la oferta. Sin embargo, cuando los niveles de oferta igualan o incluso superan a los de la demanda, es necesario innovar para lograr que el producto sea reconocido y no pierda terreno en el mercado.

También en [Preiss y Díaz \(2003\)](#) se señala que hay factores determinantes en el posicionamiento de un país en el comercio frutícola internacional: el contexto macroeconómico, la organización comercial, los aspectos tecnológicos y las innovaciones.

De ellos, destaca que el segundo y el cuarto están incidiendo de forma determinante en la competitividad de los países. En lo que respecta a la organización comercial, los casos de Nueva Zelanda y Sudáfrica sirven de ejemplo. Ellos han decidido operar mediante un sistema centralizado de control de la oferta exportable, exigiendo altos estándares de calidad. De esta forma lograron acceder a mejores niveles de precios. Por su parte Chile, ha optado por un enfoque diferente. Desarrolló un esquema de salida masiva prácticamente sin control, ofertando fruta de calidad heterogénea y precios inferiores.

En lo que atañe a innovaciones, también Nueva Zelanda ha sido uno de los países que antes y mejor ha interpretado estos cambios, siendo la primera en ser reconocida por el desarrollo de nuevas variedades. Cuando sus competidores trataron de imitar el movimiento incorporando las variedades desarrolladas por Nueva Zelanda, ésta se mudó nuevamente a nuevas y mejores variedades. De esta forma, se convirtió en el líder del mercado internacional en lo que a innovaciones varietales respecta. Esto ha impulsado que progresivamente viveristas, productores y comerciantes buscaran asociarse mediante alianzas multinacionales o clubes, de forma tal de limitar la oferta y coordinar la promoción y comercialización de las nuevas variedades, como en el caso de la variedad Pink Lady® (marca registrada de la variedad Cripp's Pink).

Este fenómeno de innovación para generar ventajas respecto de los competidores, no ha podido ser replicado con éxito en el caso de las peras, debido fundamentalmente a condiciones particulares de producción de la especie. Ésto ha hecho que, en general, primen las condiciones que han caracterizado al sector durante la mayor parte de su historia.

En conclusión, el sistema frutícola de Río Negro y Neuquén ha sacado rédito de las *ventajas estáticas* que permiten, por condiciones naturales, posicionarlo como líder mundial en el mercado de pera. Sin embargo no ha sabido generar *ventajas dinámicas* que le permitiesen seguir el ritmo de la evolución del negocio de manzanas a nivel mundial. En consecuencia, la oferta argentina prácticamente no ha cambiado y han subsistido prácticas y costumbres heredadas de épocas en las que la posición de Argentina en el mercado mundial fue resultado de la escasez de oferta del producto.

Por último, cabe mencionar que tal como se menciona en [Preiss y Díaz \(2003\)](#), los aspectos comerciales, la tecnología y las innovaciones resultan importantes para profundizar los aspectos dinámicos del negocio. En nuestro país, se puede decir que la industria ha realizado cambios tecnológicos en los últimos 15 años que permitieron una adecuada modernización. Sin embargo aún no se han tomado ventajas de otro tipo de innovaciones relacionadas con el uso de herramientas computacionales de asistencia a la toma de decisiones, que pueden tener un impacto positivo tanto en los aspectos de comercialización, como operativos y de planeamiento del negocio de la fruta a lo largo de toda la cadena de valor de esta industria. En este sentido es que la presente tesis plantea realizar una contribución, desarrollando modelos matemáticos para la optimización del proceso de toma de decisiones en diferentes horizontes de tiempo, que van desde la operación diaria, a la estratégica que cubre varias décadas, pasando por los horizontes tácticos que abarcan un ciclo anual del negocio. A partir del próximo capítulo se abordarán estos problemas.

Capítulo 3

Planeamiento estratégico

3.1. Introducción

El planeamiento estratégico involucra decisiones de largo plazo (años) y normalmente considera aspectos estructurales. Tales decisiones suelen ser “irreversibles” y, por lo tanto, su impacto afectará significativamente la eficiencia de los niveles inferiores de planeamiento.

Dependiendo de la cadena de suministro, el planeamiento estratégico puede tener diferentes objetivos ([Shapiro, 2001](#)). Por ejemplo, en muchas cadenas de suministro, la logística relacionada a la distribución de los bienes entre los diferentes nodos del sistema resulta esencial. En estos casos, determinar la localización geográfica de las plantas y los centros de distribución que brinden una relación costo-beneficio óptima suele ser el principal objetivo. Adicionalmente, si el sistema se encuentra en funcionamiento, las decisiones a tomar suelen ser del tipo de expansión o contracción de una dada capacidad en algún nodo de la cadena, así como la instalación de uno nuevo. Otro aspecto relacionado al planeamiento estratégico es la introducción de nuevos productos al portafolio de la compañía. En este sentido, muchos grupos de investigación han abordado este tipo de problemas con el empleo del modelado matemático. [Papageorgiou \(2009\)](#) presenta una revisión completa del estado del arte actual.

En este capítulo abordaremos el problema del planeamiento estratégico de la cadena de suministro de la fruta desde el punto de vista de las inversiones en plantaciones requeridas en el nodo de producción, con el objetivo de modificar la oferta de productos para mejorar el desempeño económico del sector.

Esto último, no presupone una decisión fácil de tomar para el productor. Remover una plantación antigua en producción (aunque desde el punto de vista económico no sea rentable) para instalar una nueva por la cual no se percibirá ningún tipo de ingreso al comienzo del proyecto, es un proceso que implica la conjugación de muchas aristas: económica, financiera, climática, e incluso psicológica (De Rossi, 2008).

En este sentido se puede agregar que las plantas de manzana y pera son perennes con una vida útil que puede ir desde los 20 hasta los 60 años, por lo que en principio no hay a priori un impedimento fisiológico que obligue al productor a reconvertir. No obstante, desde el punto de vista económico puede no ser conveniente que dichas plantaciones completan su ciclo de vida debido a:

- i) cambios en las preferencias de los consumidores por nuevas variedades.
- ii) avances tecnológicos que proveen mejores opciones de producción que las instaladas actualmente.

Por estas razones, una herramienta capaz de evaluar y ponderar las diferentes opciones relativas a la reestructuración varietal de una chacra productora de fruta de pepita, de forma tal de alcanzar un retorno aceptable de la actividad en el largo plazo, se presenta como un recurso deseable. El objetivo básico de este tipo de planeamiento es maximizar algún índice de rentabilidad, típicamente el valor presente neto del sistema, resultante del balance económico entre de la remoción y la plantación de diferentes variedades. Las plantaciones son divididas en diferentes grupos por edad y variedad. Cada grupo tiene diferentes productividades y, por lo tanto, genera diferentes flujos de dinero. La remoción de las diferentes plantaciones tiene también en consecuencia diferentes efectos en la función objetivo del problema.

A pesar de ser este un problema importante e interesante para analizar, muy pocos estudios lo han abordado sistemáticamente desde el punto de vista del modelado matemático. Ward y Faris (1968) propusieron un modelo de programación dinámica basado en procesos de Markov para estudiar el remplazo de plantas de ciruela. En ese trabajo se hizo énfasis en capturar el efecto estocástico en la productividad de las plantas de diferentes edades. Por su parte, Oppenheim (1979, 2003) presentó un modelo lineal multi-período para generar estrategias de remplazo en una chacra típica de fruta de pepita de una región productiva en Nueva Zelanda. También para el caso de Nueva Zelanda, Kearney (1994) propuso un modelo lineal multi-período para remplazar variedades de manzanas. En este trabajo se utilizaron perfiles de precios de venta de cada variedad consistentes en una reducción progresiva a una tasa fija para los primeros 10 años y luego, una meseta para los siguientes 10 años. Este

perfil intentaba reflejar el incremento de la demanda de fruta a escala mundial. Más recientemente [Cittadini y otros \(2008\)](#) propuso un modelo lineal multi-período para explorar opciones de sistemas de producción en la Patagonia Argentina. El modelo dinámico asigna en forma óptima las diferentes actividades de producción a los lotes de tierra disponibles. Asimismo considera varios cultivos (cereza, manzana, ciruela, durazno y nuez), así como también diferentes sistemas de conducción, riego y defensa contra las heladas. El modelo propuesto considera un horizonte de planeamiento de 50 años y dos funciones objetivo alternativas.

En este capítulo se aborda el planeamiento estratégico en la industria de la fruta de pepita, específicamente enfocado en las decisiones de reestructuración de variedades de fruta de una dada chacra, teniendo en cuenta aspectos específicos que no han sido considerados en los trabajos previamente expuestos, como la posibilidad de acceder a financiamiento externo. Por su parte, el modelo propuesto considera simultáneamente los cultivos de manzanas y peras teniendo en cuenta sus prácticas específicas de desarrollo. Además de la remoción y plantación, la reinjertación también ha sido incluida como una opción de reconversión. Adicionalmente, las plantaciones han sido clasificadas de acuerdo a su densidad, definida como la cantidad de plantas por hectárea.

Como caso de estudio el modelo es aplicado a una chacra típica localizada en la región del Alto Valle de Río Negro. Si bien el sistema bajo estudio tiene características especiales, el modelo fue desarrollado en términos generales de modo tal que su aplicación puede ser extendida a unidades productivas similares.

3.2. Descripción del problema

La rentabilidad neta anual del negocio de los productores de fruta de pepita está dada por la suma de las ventas de la producción de las diferentes variedades, menos los costos de mantenimiento de la infraestructura existente y las inversiones en reestructuración de las plantaciones.

En principio, en una chacra pueden ser desarrolladas cualquiera de las diferentes variedades de manzanas y peras disponibles en el mercado. A su vez, cada variedad puede ser instalada en cualquiera de las tres densidades de plantación consideradas: baja, media y alta. Es necesario destacar que cada densidad tiene sus propios costos de instalación y productividades. Por ejemplo, las plantaciones de alta densidad requieren inversiones mayores que las de baja densidad, pero tienen una entrada en

producción más temprana, resultando en una mayor producción de fruta a lo largo de su ciclo productivo.

Por su parte, una chacra está normalmente dividida en parcelas productivas, conocidas como “cuadros”. Cada cuadro tiene, en general, diferentes plantaciones en términos de variedad, edad y densidad de plantación, y puede ser trabajado independientemente de acuerdo a su historia productiva.

En lo que respecta a la evolución de la productividad de las plantaciones, hemos considerado que la misma puede ser dividida en tres fases, las cuales fueron definidas según información recopilada de productores e instituciones de la zona del Alto Valle. Los primeros años posteriores a la plantación no hay producción de fruta. Después se presenta un período intermedio de crecimiento sostenido de productividad hasta que se alcanza la madurez. Una vez alcanzada la madurez productiva, el volumen de producción permanece constante hasta virtualmente alcanzar el final de la vida de la plantación.

Para todas las variedades son considerados tres mercados de comercialización: exportación, mercado interno e industria. Como vimos en el Capítulo 2, la fruta destinada al mercado de exportación es la de mejor calidad. La fruta comercializada en el mercado interno es de calidad intermedia, mientras que el remanente es industrializado para la producción de jugo. Cada variedad tiene asignado un precio de venta y una distribución diferente en cada uno de los posibles mercados de destino.

En cuanto a los costos generados por la actividad, los mismos se pueden clasificar en tres grupos: costos fijos, variables e inversiones. Los primeros están principalmente relacionados al mantenimiento de las plantaciones, no dependen del nivel de productividad, sino de la superficie ocupada por plantaciones que es necesario atender. Estos incluyen riego y fertilización, así como prácticas culturales, tales como poda y raleo (Tabla 2.1).

Los segundos comprenden todos aquellos costos que se generan al momento de recolectar la fruta. Como vimos también en el Capítulo 2, una de las características de la producción frutícola es la gran cantidad de mano de obra necesaria en época de cosecha.

Tercero, desde el punto de vista de las inversiones, los costos asociados con la remoción de las plantaciones antiguas y la instalación de las nuevas son los más significativos. Aquí también incluimos la técnica de reinjertación, que consiste en talar las plantaciones antiguas e injertar una nueva variedad sobre el pie de la plantación

anterior. Este método de reconversión ha sido considerado dado que permite el desarrollo de la nueva plantación a menores costos y se logran entradas en producción más tempranas.

Por último, para poder evaluar económicamente el proyecto y decidir sobre las inversiones es necesario considerar un horizonte de planeamiento prolongado dado que a las plantaciones les toma varios años crecer y comenzar a producir fruta. Desde un punto de vista financiero, hemos incluido la opción de que el dueño de la chacra puede pedir préstamos para poder hacer las inversiones relacionadas a la instalación de nuevas plantaciones. Por lo tanto, el análisis económico debe considerar el pago de dichos préstamos en la formulación de los flujos de dinero.

Basado en lo expuesto anteriormente, se formuló un modelo de programación matemática para generar estrategias óptimas de reestructuración de chacras productoras de manzanas y peras. El modelo determinístico multi-período mixto entero lineal (MILP) propuesto proporciona la superficie anual a remover y plantar de cada variedad en cada uno de los cuadros de la chacra. Dado que hay involucradas inversiones a largo plazo, el valor presente neto (VPN) ha sido adoptado como función objetivo a optimizar.

La estructura general del modelo corresponde a la siguiente formulación multi-período mixto entera (En el Apéndice A se proporciona la versión detallada del modelo y en los Apéndices B y C los datos y nomenclatura, respectivamente):

$$\begin{aligned}
 \max \quad & VPN = -Budget_0 + \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 + rd)^t} \cdot \mathbf{CF}_t \\
 \text{s.t.} \quad & \text{A.1–A.23} \\
 & \text{A.25–A.46}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

El VPN se calcula como la suma de los flujos de dinero (\mathbf{CF}_t) descontados a lo largo del horizonte de planeamiento, usando la tasa de descuento (rd), menos el presupuesto inicial ($Budget_0$) con el que cuenta el productor al momento de iniciar el proyecto. Se trata de una función lineal en términos de los flujos de dinero, ya que el horizonte de tiempo, la tasa de descuento y el presupuesto inicial se asumen constantes. El cálculo de los flujos de dinero se realiza en la Ecuación A.25.

Los bloques de restricciones subsiguientes (A.1–A.23 y A.25–A.46) representan el conjunto de restricciones lineales de igualdad y desigualdad que componen el modelo. Un primer grupo de restricciones realizan lo que hemos denominado “balances de superficie” (Sección A.1), donde se identifica el estado de la chacra en cada período

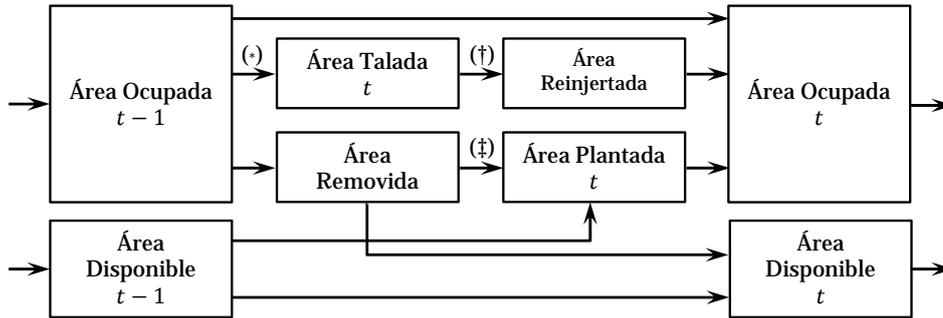


Figura 3.1 – Esquema de balances de superficie. Los bloques exteriores caracterizan la estructura de la chacra en los períodos t y $t-1$. Los bloques intermedios representan las actividades consideradas. Las flechas conectan las posibilidades permitidas. $(*)$ Sólo puede ser llevada a cabo en plantaciones jóvenes de alta densidad. $(†)$ Sólo es posible injertar una variedad de manzana sobre un pie de manzana; ídem para peras. $(‡)$ Sólo permitido si el remplazo involucra plantaciones de especies diferentes (remoción de manzanas/ plantación de peras y viceversa).

del horizonte de tiempo. En el modelo detallado, las variables asociadas a esta sección son identificadas por una combinación de índices: los cuadros de la chacra (i), las densidades de plantación (s), las variedades de fruta (j), la edad de la plantación en años (e) y el período de planeamiento correspondiente (t).

En la Figura 3.1 se representan gráficamente los balances de superficie realizados. El modelo decide si una plantación presente en un dado período ($AreaOcupada_{t-1}$), continúa siendo parte de la chacra ($AreaOcupada_t$), es talada ($AreaTalada_t$), o removida ($AreaRemovida_t$) en el período siguiente. Si es removida, puede ser remplazada inmediatamente por una nueva plantación ($AreaPlantada_t$) o permanecer disponible ($AreaDisponible_t$). Si la plantación es talada, la reinjertación debe ser realizada en el mismo período ($AreaReinjertada_t$). Por otra parte, si existía área disponible en el período anterior ($AreaDisponible_{t-1}$), la misma puede ser utilizada para nuevas plantaciones ($AreaPlantada_t$), o bien permanecer disponible ($AreaDisponible_t$). Finalmente, si una plantación alcanza el máximo de su vida útil, debe ser removida.

Adicionalmente, se impone que se debe esperar al menos un año entre las actividades de remoción y plantación si la misma especie es instalada (remover manzanas/ plantar manzanas, lo mismo con las peras) en un dado cuadro, básicamente debido a razones sanitarias. Por el contrario, cuando las especies removida y plantada son diferentes, las actividades de remoción y plantación pueden tener lugar en el mismo período.

Sabiendo la variedad, edad y densidad de cada plantación, es posible calcular su

volumen de producción anual. No obstante, hemos considerado un requerimiento adicional que consiste en exigir una distribución uniforme de la producción a lo largo del período de cosecha, denominado “control de cosecha”. El objetivo del control de cosecha es asegurar cada año un volumen de producción semanal acotado entre valores mínimos y máximos. Una distribución uniforme a lo largo de la temporada necesariamente requiere la instalación de un número mínimo de variedades. Esta práctica apunta principalmente a reducir riesgos. Puede suceder que el máximo beneficio sea alcanzado mediante la plantación de una única variedad preferida por el mercado. Sin embargo, esta es una estrategia arriesgada ya que las preferencias del mercado pueden cambiar inesperadamente, o bien la producción de dicha variedad puede verse afectada por razones climáticas o sanitarias. Además, una distribución uniforme a lo largo del período de cosecha facilita la contratación de mano de obra ya que es más probable atraer trabajadores temporales por el período de cosecha completo que por el período breve correspondiente a una sola variedad. Las ecuaciones utilizadas en este trabajo para el control de cosecha son una versión modificada de las presentadas por [Kearney \(1994\)](#). El control de cosecha es activado a partir de un cierto año del horizonte de planeamiento definido por el usuario. De esta forma se permite un período de adaptación en caso de que la estructura inicial de la chacra no esté balanceada en este aspecto y sean necesarios varios años para alcanzar el balance deseado.

Las actividades mencionadas hasta aquí son ponderadas económicamente de forma tal de influir en el valor de la función objetivo del problema. Los cálculos económicos incluyen: ingresos generados por la venta de la fruta, costos fijos operativos generados por las labores culturales; gastos generales, los cuales son función del tamaño de la chacra e incluyen actividades de administración, consultoría técnica, impuestos y servicios; costos variables correspondientes a la recolección de la fruta –incluyen mano de obra y transporte–; costos de remoción de las plantaciones; costos de inversión, calculados considerando ambos métodos de reconversión: instalación de nuevas plantaciones, y reinjertación. Se realiza también el cálculo de depreciación de las plantaciones utilizando el método lineal ([Blank y Tarquin, 2002](#)). Finalmente, en el último período de planeamiento se calcula el valor de continuidad considerando que el proyecto continúa más allá del horizonte de planeamiento como el ingreso que generaría la estructura final de la chacra hasta que todas sus plantaciones alcancen su máxima vida útil. En este apartado se ha incluido la posibilidad de acceder a financiación externa para realizar inversiones de reestructuración a través del sistema de repago francés, en el cual la deuda se salda mediante cuotas iguales ([Blank y](#)

Tarquin, 2002).

También ha sido implementado un control de presupuesto que limita el egreso de dinero en cada período. La técnica adoptada es una versión modificada de la presentada en Cittadini y otros (2008), ya que al incluir la posibilidad de acceder a financiamiento externo el esquema de control de presupuesto considera que la salida de dinero en el período t debe ser menor o igual al presupuesto del período anterior más la cantidad de dinero que se ha pedido prestada.

Por último, para evitar la remoción y plantación de superficies muy pequeñas, se han incluido restricciones que hacen uso de variables binarias para forzar que las áreas ocupadas y disponibles estén dentro de un rango práctico o sean 0. La misma estrategia fue utilizada en la sección de financiación donde se emplean variables binarias para modelar si se pide dinero o no. Si se accede a un préstamo, su monto debe estar dentro de un cierto rango.

El modelo MILP descrito fue implementado en la plataforma de modelado y optimización GAMS 23.0 (Brooke y otros, 1988) y resuelto con CPLEX 11.2 (GAMS, 2009). Para resolver los casos de estudio que serán presentados a continuación fue utilizada una computadora con procesador Intel®Core™ 2 Quad Q8200 @ 2.33 GHz con 2.96 GB de memoria RAM.

3.3. Casos de estudio

Con el objetivo de mostrar el desempeño del modelo propuesto se ha considerado como caso de estudio una chacra típica del Alto Valle de Río Negro. Normalmente la estructura de una chacra de este tipo está conformada por manzanas y peras de distintas variedades, edades y densidades de plantación. En todos los casos los datos fueron obtenidos de fuentes oficiales (Leskovar y otros, 2010; Rodriguez y otros, 2009; Villarreal y otros, 2008) y de comunicación personal con empresarios del sector cuando las fuentes oficiales no disponían de los datos necesarios. La Tabla 3.1 proporciona el estado inicial de la chacra bajo estudio. Ésta tiene 52 hectáreas y está dividida en cinco cuadros. Allí se detalla el número de hectáreas plantadas por variedad y la superficie disponible en cada cuadro. Una dada variedad puede estar instalada en plantaciones de diferentes densidades y edades. Cada plantación es descrita por una triada: área/edad/densidad de plantación. Así por ejemplo, el cuadro 2 tiene una superficie de 8 hectáreas, 0.6 de las cuales se encuentran disponibles. Está ocupado por una plantación de 2 hectáreas de manzana Granny

Smith que tiene 30 años de edad y es de baja densidad. Además tiene 3.6 hectáreas de una plantación de manzana Red Delicious de 31 años de baja densidad y otras 1.8 hectáreas de una plantación de pera William's de 30 años, también en baja densidad.

El tamaño del modelo, depende en gran parte de la cantidad de elementos que conforman los distintos conjuntos. Hemos considerados que la chacra está compuesta por 5 cuadros, 3 densidades de plantación (alta, media y baja), 9 variedades de fruta (4 de manzana y 5 de pera), 35 años de edad máxima de las plantaciones, y un horizonte de planeamiento de 20 años subdividido en períodos anuales. De esta forma, el modelo MILP tiene 527.307 ecuaciones, 535.847 variables continuas y 97.300 variables binarias. Toda la información adicional necesaria es presentada en el Apéndice B. Cabe señalar que todos los valores de los parámetros han sido considerados constantes durante todo el horizonte de planeamiento.

3.3.1. Análisis de escenarios de financiamiento

Con el objetivo de mostrar la influencia de diferentes políticas de financiamiento, se realiza un análisis de tres escenarios, a saber:

- i) Sin financiamiento: No hay posibilidad de acceder a financiamiento externo.
- ii) Financiamiento a 5 años: Disponibilidad de acceder a financiamiento externo con un período de repago de 5 años.
- iii) Financiamiento a 10 años: Disponibilidad de acceder a financiamiento externo con un período de repago de 10 años.

3.3.2. Análisis de sensibilidad

Para mostrar cómo variaciones en algunos de los datos ingresados al modelo impactan en la función objetivo y la estructura final obtenida, se realizan análisis de sensibilidad sobre tres parámetros de interés para el escenario "Sin financiamiento"; a saber:

- i) Restricciones de cosecha: Se estudian variaciones en el valor de la capacidad semanal máxima (Q_{max}) y mínima (Q_{min}). Al igual que en el caso base, en todos los casos, Q_{max} es un 25 % mayor a Q_{min} . Q_{min} se varió desde un valor bajo (40 ton/semana) al valor máximo aceptado antes de que el problema se convierta en infactible (134 ton/semana). Valores bajos de este parámetro están

Tabla 3.1 – Estado inicial de la chacra.

C ¹	Área ² Libre	Variedad ³													
		G	GS	CP	RD	AF	BD	PT	RB	W					
1	10	1.2	1.9/5/A ⁴	1.1/15/M	0.5/3/A	2.7/8/A	0.9/3/A	0.7/1/A	1.0/6/A						
2	8	0.6		2.0/30/B		3.6/31/B								1.8/30/B	
3	12	0.7		0.6/20/M		2.3/21/M			0.6/21/M	1.6/13/M	1.8/15/M	1.0/18/B		0.8/23/B	
				0.6/26/B		2.0/27/B								1.3/13/M	
4	10	0.7	0.9/14/M			3.5/16/M								1.3/13/M	
														3.6/5/A	
5	12	8.8							0.8/12/M	0.7/25/B				1.1/30/B	
														0.6/20/M	
Total	52	12	2.8	4.3	0.5	14.1	0.9	2.1	5	1.8				8.5	

¹ Cuadros de la chacra

² Todos los valores de superficie están en ha.

³ Variedades consideradas: G: Gala; GS: Granny Smith; CP: Cripp's Pink; RD: Red Delicious; AF: Abate Fetel; BD: Beurre D'Anjou; PT: Packam's Triumph; RB: Red Bartlet; W: William's.

⁴ Área en ha./edad en años/densidad de plantación (B:Baaja; M:Media; A:Alta)

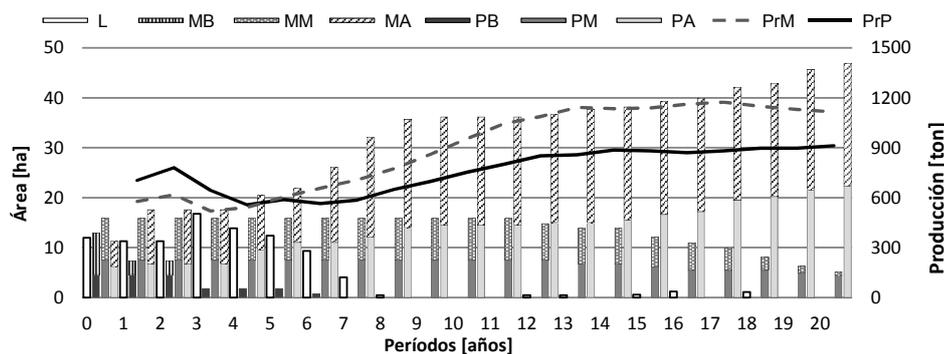


Figura 3.2 – Evolución anual de la densidad de plantación y niveles de producción por especies. L: Área disponible, MB: plantaciones de manzana de baja densidad, MM: plantaciones de manzana de media densidad, MA: plantaciones de manzana de alta densidad, PB: plantaciones de pera de baja densidad, PM: plantaciones de pera de media densidad, PA: plantaciones de pera de alta densidad, PrM: producción de manzanas, PrP: producción de peras.

asociados a bajos niveles de producción y por lo tanto a menores requerimientos de mano de obra.

- ii) Presupuesto inicial: Para investigar cómo son afectadas las soluciones propuestas por el modelo con el presupuesto inicial, su valor fue cambiado desde U\$S 327.000 hasta U\$S 575.000.
- iii) Tasa de descuento: Para ilustrar cómo el factor de aversión al riesgo influye en las decisiones tomadas por el modelo, se realizó un análisis de sensibilidad en la tasa de descuento. El valor del parámetro fue cambiado desde un 0% hasta un 25% en incrementos del 1%.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1. Análisis de escenarios de financiamiento

Para el caso “Sin Financiamiento”, la Figura 3.2 muestra la evolución del área ocupada por las plantaciones de manzana (barras con tramas) y pera (barras en tonos de grises sólidos), junto con el área disponible (barras blancas). Los datos de las distintas variedades se presentan integrados por especie y discriminados por densidad de plantación. Por su parte, la producción anual de cada una de las especies se reporta sobre el eje derecho (la línea a guiones corresponde a la producción de manzanas, mientras que la sólida a la de peras).

En primer lugar, en la Figura 3.2 se puede ver que el área disponible alcanza un valor nulo en el octavo período después de pasar por un máximo en el período 3. Es también evidente que el modelo propone una transición desde plantaciones de baja y media densidad a plantaciones de alta densidad. Las plantaciones de manzana de baja densidad son removidas en su totalidad en el tercer período, mientras que para el caso de las peras la remoción total de las plantaciones de baja densidad es alcanzada en el séptimo período. Las plantaciones de media densidad son mantenidas hasta el período 11 y luego decaen paulatinamente hasta el final del horizonte de planeamiento. La mayoría de las plantaciones de manzana de media densidad son removidas al final del horizonte de planeamiento, mientras que las plantaciones de pera permanecen formando parte de la estructura final de la chacra. Cuando se deciden realizar inversiones, siempre se opta por invertir en plantaciones de alta densidad. Aunque los costos de inversiones son mayores para este caso (Tabla B.4), es claro que su temprana entrada en producción (Tabla B) y sus menores costos operativos (Tabla B.3) favorecen esta opción productiva.

Finalmente, se puede observar que al comienzo del horizonte de planeamiento, hay una disminución de la producción de ambas especies. Esto se debe a la remoción de plantaciones antiguas que se encuentran todavía en producción y la instalación de nuevas plantaciones que no producen fruta en los primeros períodos. A medida que se avanza en el tiempo, las nuevas plantaciones comienzan a producir y su producción se estabiliza en valores altos hacia el final del horizonte de estudio.

La Figura 3.3a y 3.3b muestra la evolución del área ocupada de dos variedades de manzana particulares (Cripp's Pink y Red Delicious, respectivamente). La diferente escala de grises representa plantaciones de diferentes edades dentro de la estructura de la chacra. La información está desagregada en cada período por densidad de plantación. En el eje derecho, se puede leer la producción anual (línea continua).

La variedad de manzana Cripp's Pink (Figura 3.3a) es una de las variedades más rentables debido a su elevado precio de exportación, resultante de su amplia aceptación en el mercado externo (Tabla B.2). Es por esto que el modelo propone varias inversiones en plantaciones de alta densidad de esta variedad a lo largo del horizonte de planeamiento. La pequeña fracción de superficie de alta densidad al comienzo del horizonte de planeamiento (Tabla 3.1) es mantenida durante todo el horizonte de estudio. En el período 2, aparecen dos barras adicionales que corresponden a la reinjertación de esta variedad sobre los pies de otras variedades de manzanas menos favorables económicamente. En el período 4, se agrega otra barra, permaneciendo

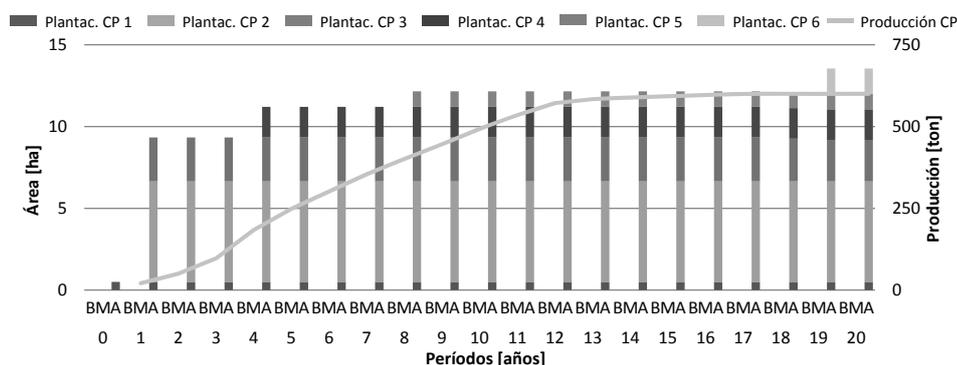
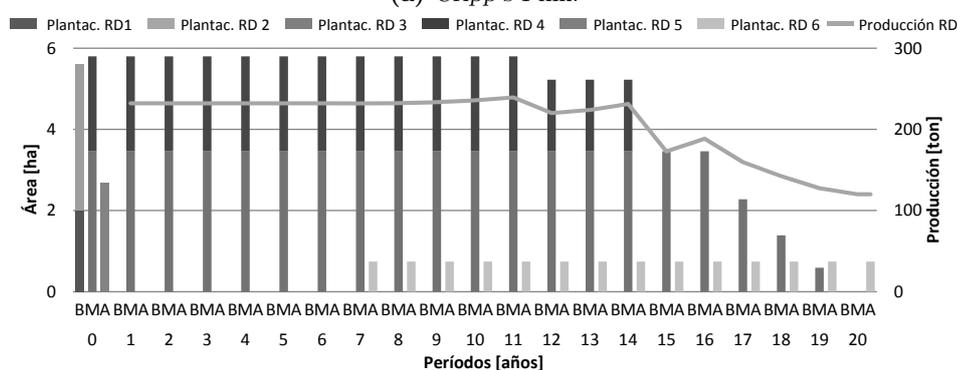
(a) *Cripp's Pink*.(b) *Red Delicious*.

Figura 3.3 – Evolución de las plantaciones desagregadas por densidad de plantación, junto con la producción anual. BMA: Baja / Media / Alta densidad. Los segmentos apilados corresponden a plantaciones de diferentes edades.

esta estructura invariable hasta el año 7. Posteriormente, en el año 8 una nueva plantación es agregada y la estructura resultante de Cripp's Pink se mantiene hasta el año 19 cuando se decide incluir una plantación adicional de alta densidad.

En el caso de la manzana Red Delicious (Figura 3.3b), las dos plantaciones existentes de baja densidad son removidas en el primer año. Adicionalmente, la plantación de alta densidad es talada para poder reinjertar otra variedad de manzana más rentable (Cripp's Pink). Por su parte, las dos plantaciones de densidad media presentes al comienzo del horizonte de planeamiento permanecen en la chacra hasta el período 11. Una porción de una de ellas es removida en el período 12 y completamente eliminada en el período 15 debido a que alcanza la edad máxima permitida (35 años). La plantación de media densidad restante es removida gradualmente a partir del año 16. En lo que respecta a plantaciones de alta densidad de esta variedad, en el período 7 se realiza la única inversión. Cabe mencionar que a pesar de no ser ésta una de las variedades más rentables (Tabla B.2), su presencia es requerida para

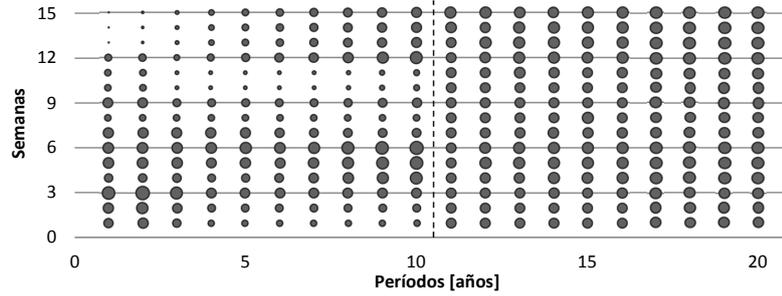


Figura 3.4 – Volumen de fruta recolectada semanalmente durante el horizonte de planeamiento. El tamaño de las burbujas representa la producción semanal. El control de cosecha es activado después del año 10 (línea discontinua).

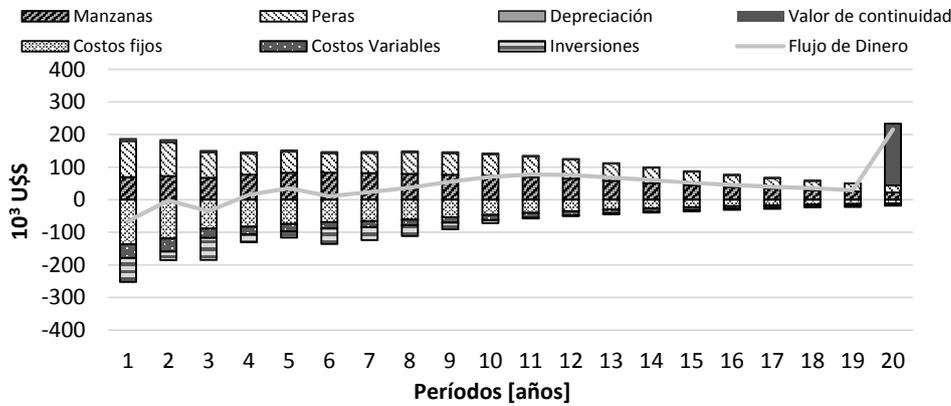


Figura 3.5 – Análisis económico (sin financiamiento). Barras positivas indican ingresos de dinero. Barras negativas indican egresos de dinero.

mantener balanceado el volumen de cosecha semanal (Tabla B.5).

Para mostrar el efecto del control de cosecha implementado en la solución propuesta por el modelo, en la Figura 3.4 se presenta un gráfico de burbuja con el volumen de fruta semanal recolectada en cada período durante todo el horizonte de planeamiento. El tamaño de la burbuja representa la cantidad de fruta recolectada en cada semana de cosecha de cada año del horizonte de planeamiento. La línea vertical discontinua indica el periodo en el cual se activa el control de cosecha (T^{CC} , página 156 del Apéndice B). Se puede observar cómo, desde una chacra no balanceada en términos del volumen de cosecha semanal, el modelo planifica la reestructuración de variedades de forma tal de lograr el balance deseado a partir del año 10 cuando dicho control es activado.

Por otra parte, en la Figura 3.5 se reportan las distintas componentes económicas consideradas, cuyos valores son fruto del proceso de reconversión propuesto por la

solución del problema. En todos los casos los valores son descontados a la tasa de descuento rd (página 156 en el Apéndice B), después de impuestos (tasa de impuestos rt , página 156 en el Apéndice B). Las barras positivas indican ingresos: ingreso por la venta de las manzanas y las peras, depreciación y valor de continuidad en el último período. Por su parte, las barras negativas corresponden a los egresos de dinero: costos fijos -que incluyen costos operativos y gastos generales-, costos variables e inversiones -considerando la reconversión por vía tradicional y por el método de reinjertación-. Además, la línea sólida muestra el valor del flujo de dinero descontado en cada período, calculado como la diferencia entre las barras positivas y negativas.

Se observa por ejemplo que los ingresos producidos por las ventas de manzanas y peras son similares. Por otro lado, los costos fijos son incluso mayores que los costos de inversión, lo que constituye de hecho una de las principales preocupaciones de los productores de la zona bajo estudio. La política óptima de reconversión incluye numerosas inversiones, principalmente durante los primeros 10 períodos del horizonte de estudio. Asimismo, se puede notar que desde el cuarto año en adelante, el flujo anual descontado se vuelve positivo, junto con una reducción sostenida del mismo hacia el final del horizonte debido básicamente al efecto de la tasa de descuento. Por último, el valor de continuidad obtenido de la estructura final de la chacra hace que el último valor del flujo de dinero crezca de forma sustancial. Cabe recordar que el mismo es calculado proyectando los flujos futuros que la estructura final generaría hasta que todas las plantaciones alcancen el final de su ciclo productivo.

A continuación se presenta una comparación entre los tres escenarios de financiamiento estudiados: sin crédito, crédito a 5 años y crédito a 10 años (el valor de la tasa de los créditos i_{cred} se reporta en la página 156). Las Figuras 3.6a y 3.6b muestran los flujos descontados acumulados y la densidad de plantación de promedio anual para cada escenario, respectivamente. La densidad promedio anual se calcula como el cociente entre el número de plantas presentes en un dado año y el área total de la chacra (Ecuación A.47). Los valores de la función objetivo, que corresponden al marcador circular en la Figura 3.6a, para cada escenario analizado son: “Sin financiamiento”: $VPN = \text{U}\$ 378.110$; “Financiamiento a 5 años”: $VPN = \text{U}\$ 428.657$; “Financiamiento a 10 años”: $VPN = \text{U}\$ 502.856$. Como era de esperar se observa que el valor del VPN crece cuando hay posibilidad de acceder a financiamiento externo.

Adicionalmente, en la Figura 3.7 se muestran las componentes económicas resultan-

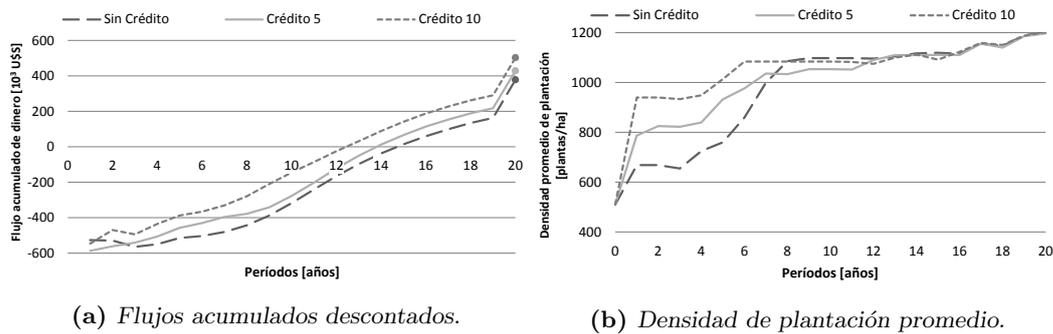
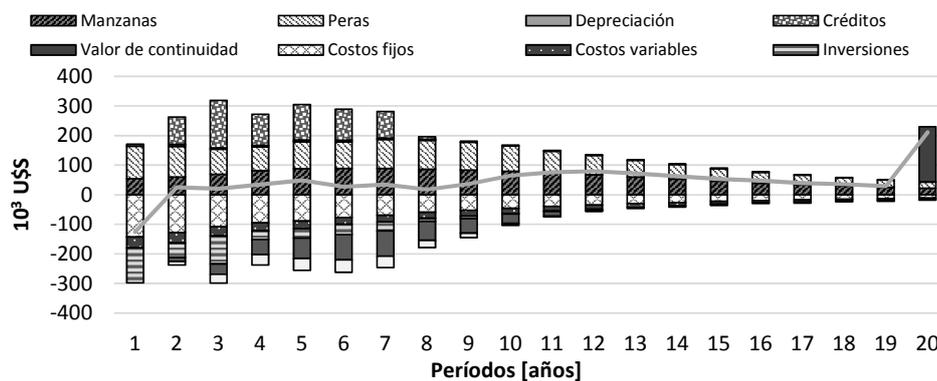


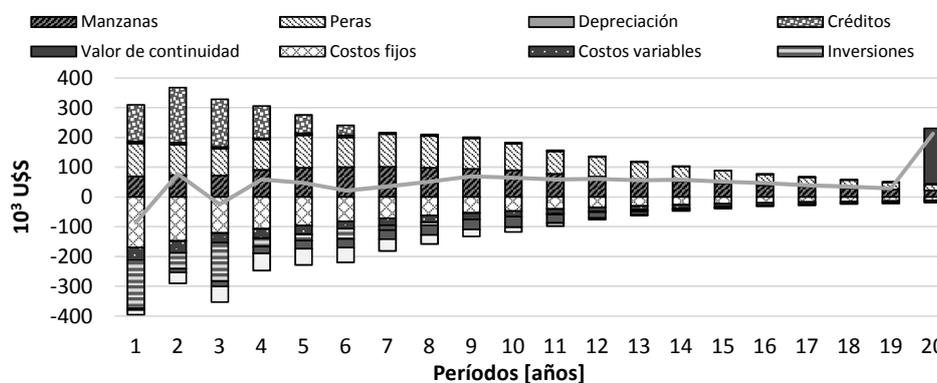
Figura 3.6 – Comparación entre los tres escenarios de financiamiento considerados a lo largo del horizonte de planeamiento.

tes de los escenarios con financiamiento para complementar la información presentada hasta aquí. Cabe señalar que en este caso, el hecho de considerar la posibilidad de acceder a financiamiento externo, genera la aparición de nuevas variables en el gráfico asociadas a esta posibilidad. Se observa que la disponibilidad de financiamiento externo favorece decisiones de reestructuración más agresivas. En el caso de financiamiento a 5 años, el modelo recomienda una serie de siete préstamos comenzando en el segundo período (Figura 3.7a). En el primer año no se pide un préstamo dado que el presupuesto inicial disponible no permite cubrir los valores de repago. Por su parte, en el caso de financiamiento a 10 años (Figura 3.7b), se sugiere un conjunto de seis préstamos comenzando en el primer período. En este caso, el presupuesto inicial sí es suficiente para poder cumplir con el valor de repago de un préstamo tomado en el año 1.

Por inspección de la Figura 3.6a se observa que cuanto más flexible es la opción de financiación disponible, más rápidamente el flujo de dinero acumulado descontado correspondiente se vuelve positivo, acortando en consecuencia el período de repago del proyecto (15, 13 y 12 años, respectivamente). Por su parte, la Figura 3.6b permite observar claramente que la velocidad de transición para alcanzar la estructura final es significativamente mayor en los casos con posibilidad de acceso a financiamiento. El modelo con préstamos a 10 años alcanza una densidad de plantación promedio de 900 plantas por hectárea en el primer período partiendo de una chacra con una densidad promedio inicial de 500 plantas por ha, mientras que para los casos con financiamiento a 5 años y sin financiamiento le toma 5 y 6 años respectivamente alcanzar dicho valor. También se puede inferir que la tendencia a largo plazo es la misma para todos los escenarios, dado que las tres curvas quedan virtualmente superpuestas al final del período de estudio (del año 13 en adelante). El hecho de que no haya diferencias significativas entre las estructuras finales de la chacra indica



(a) Crédito a 5 años.



(b) Crédito a 10 años.

Figura 3.7 – Análisis económico. Barras positivas indican ingresos de dinero. Barras negativas indican egresos de dinero.

que la optimización lleva a una “única” solución independientemente del esquema de financiación considerado (Tabla 3.2). Como se muestra en la Figura 3.6b la diferencia radica principalmente en la velocidad de transición entre los dos estados.

La razón de esto último está en que el aumento de la densidad promedio es alcanzado por la inversión de nuevas plantaciones de alta densidad. Adicionalmente, cuanto antes se realizan las inversiones, antes las nuevas plantaciones entran en producción y mayores volúmenes de fruta son comercializados durante el horizonte de planeamiento traduciéndose en una mayor rentabilidad. En conclusión, los resultados encontrados han permitido evaluar el impacto de las diferentes políticas de financiación. Se considera que estudios de este tipo podrían ser útiles tanto para el asesoramiento de inversores como para el diseño de programas de promoción de la actividad por parte del Estado o de privados.

Tabla 3.2 – Composición varietal final para los 3 escenarios de financiamiento.

Variedades	Composición (%)		
	Sin crédito	Crédito 5	Crédito 10
William's (W)	12.2	12.2	12.2
Red Bartlet (RB)	1.5	2.5	1.5
Beurre D'Anjou (BD)	6.0	5.8	5.9
Abate Fetel (AF)	24.4	24.0	24.4
Packam's Triumph (PT)	7.2	6.9	7.4
Gala (G)	1.3	1.2	1.3
Red Delicious (RD)	7.4	7.6	7.1
Granny Smith (GS)	12.8	12.8	12.8
Cripp's Pink (CP)	27.2	27.0	27.3

3.4.2. Análisis de sensibilidad

Restricciones de cosecha

Los resultados generales obtenidos del análisis de sensibilidad realizados sobre la variación del volumen de recolección semanal mínimo exigido (Q) una vez que el control de cosecha ha sido activado, se muestran en las Figura 3.8. En la Figura 3.8a, la línea sólida reporta el valor del VPN sobre el eje izquierdo, mientras que la producción total es representada por la línea discontinua y se lee sobre el eje derecho. Adicionalmente, el marcador cuadrado muestra el escenario correspondiente al caso base, y el marcador circular señala el valor óptimo de Q donde se alcanza el máximo VPN . Por su parte, la Figura 3.8b muestra la estructura final de la chacra para valores de Q en torno al óptimo (110 ton/semana).

A bajos valores de Q (< 110 ton/semana) la solución incluye área no ocupada en la estructura final (línea de trazo y punto en la Figura 3.8b). A medida que Q crece, se obtiene un incremento en la rentabilidad de la chacra a expensas de la ocupación del área libre con nuevas plantaciones, principalmente de las variedades más rentables (CP y AF, Tabla B.2).

Posteriormente, para valores de Q entre 110 y 115 ton/semana, se recomiendan nuevas inversiones en CP y AF. Incrementos adicionales hasta 125 ton/semana, requieren la inclusión de variedades menos rentables (W, GS y RD, Tabla B.2). En este segmento (115-125 ton/semana) CP todavía aumenta, pero AF alcanza una meseta. A partir de 125 ton/semana, mayores niveles semanales de producción sólo pueden ser obtenidos reduciendo la participación de CP y aumentando aquellas de

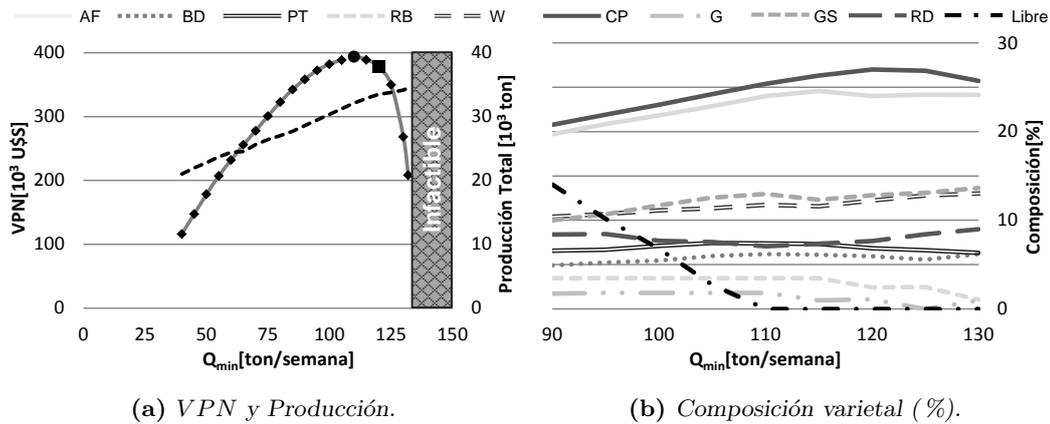


Figura 3.8 – Resultados del análisis de sensibilidad sobre las restricciones de cosecha. (a) VPNs (línea continua) y niveles de producción obtenidos (línea discontinua). (b) Composición final de la chacra en lo que respecta a variedades, junto con el área disponible.

W, GS y RD.

Finalmente, cuando Q es mayor a 134 ton/semana, el problema se vuelve infactible porque el área total de la chacra no es suficiente para alcanzar el nivel semanal de productividad requerido. Vale la pena notar que el valor de Q adoptado en el escenario del caso base es mayor al correspondiente al del nivel óptimo de rentabilidad (marcador cuadrado y circular en la Figura 3.8a, respectivamente).

Presupuesto inicial

Un análisis de sensibilidad sobre el presupuesto inicial es reportado en la Figura 3.9. El presupuesto inicial fue aumentado desde U\$S 327.000 hasta U\$S 575.000. Para valores inferiores a 327.000 el problema se vuelve infactible. Por su parte, para valores mayores al límite superior no se observan cambios significativos en la solución alcanzada. Como en el estudio previo, VPN (línea sólida) se muestra junto con el correspondiente nivel de producción total (línea a trazos)(Figura 3.9a). Nuevamente, el marcador cuadrado muestra el escenario del caso base, y el marcador circular corresponde al valor óptimo de $Budget_0$. Por su parte, la Figura 3.9b muestra la composición final alcanzada por los diferentes valores de $Budget_0$.

La primera conclusión que se puede extraer de la Figura 3.9a es que no es posible alcanzar las especificaciones requeridas –los volúmenes mínimos de recolección semanal una vez activado el control de cosecha– si $Budget_0$ es menor a U\$S 327.000 dado que el problema se vuelve infactible. Esta información nos permite saber de antemano el presupuesto inicial mínimo necesario para realizar inversiones de reestructuración

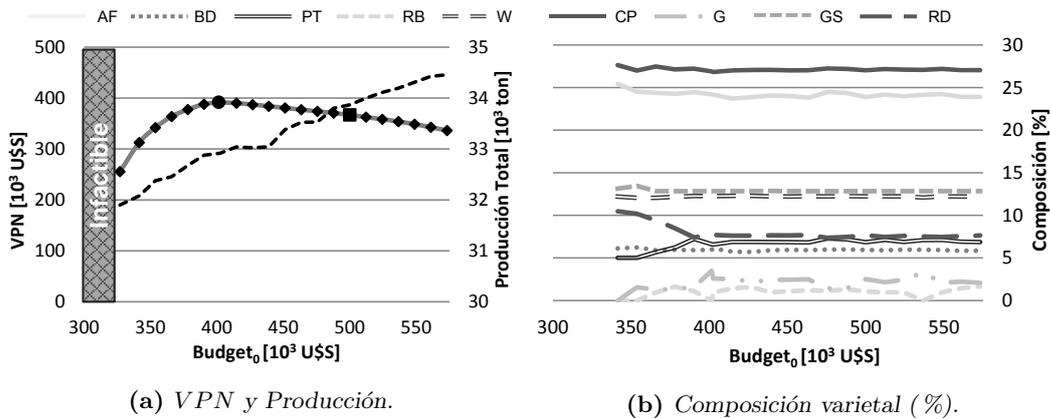


Figura 3.9 – Resultados del análisis de sensibilidad sobre el presupuesto inicial. (a) Valores de VPNs (línea continua) y niveles de producción obtenidos (línea discontinua). (b) Composición final de la chacra en lo que respecta a variedades.

en un escenario sin financiación.

El VPN crece con $Budget_0$ hasta este último alcanzar los US\$ 401.000. A partir de ahí, comienza a decrecer. Esto se debe al hecho de que el incremento de los flujos de dinero descontado no compensa el presupuesto inicial asignado al proyecto. Como en la sección previa, pero esta vez para el caso de $Budget_0$, el valor del parámetro considerado en el escenario del caso base (marcador cuadrado en la Figura 3.9a), seleccionado de forma arbitraria aproximadamente un 50% mayor al presupuesto mínimo, es mayor al correspondiente al nivel óptimo de rentabilidad (marcador circular en Figura 3.9a).

Adicionalmente se puede observar que el nivel total de producción crece casi linealmente con el aumento de $Budget_0$ (línea a trazos en la Figura 3.9a). Esto no se debe a que son realizadas más inversiones, sino a que éstas son ejecutadas antes en el horizonte de planeamiento. Por lo tanto, la transición hacia la estructura final es alcanzada más rápidamente permitiendo que las nuevas plantaciones incluidas produzcan sobre un período más extenso. Situación similar a la producida al incluir la posibilidad de acceder a financiamiento externo.

Por su parte, la Figura 3.9b muestra que una vez que el valor óptimo de $Budget_0$ es alcanzado, no hay variaciones significativas en la estructura final de la chacra. Por debajo de este valor, se encuentran algunas diferencias, principalmente en las plantaciones de RD y PT.

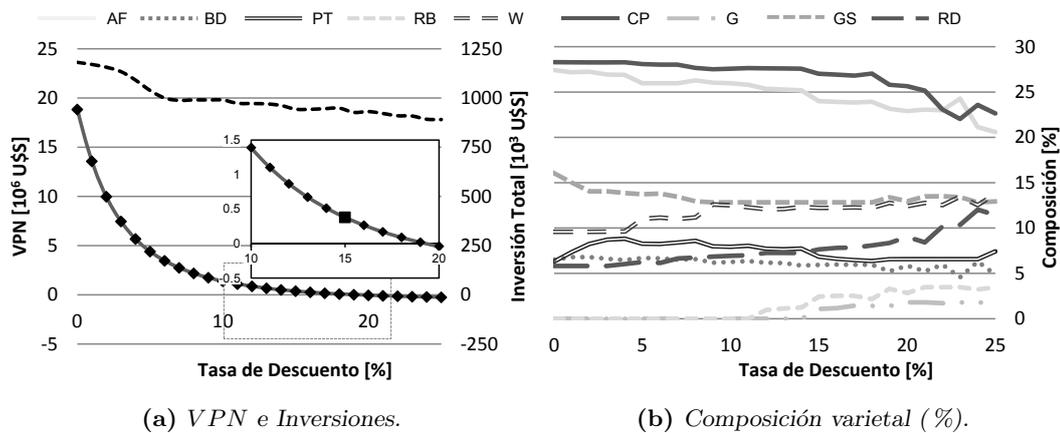


Figura 3.10 – Resultados del análisis de sensibilidad sobre la tasa de descuento. (a) Valores de VPNs (línea continua) e inversiones realizadas (línea discontinua). (b) Composición final de la chacra en lo que respecta a variedades.

Tasa de descuento

La Figura 3.10a muestra la influencia de la tasa de descuento sobre el VPN (eje izquierdo). La línea discontinua corresponde a la inversión total planificada para los diferentes valores de tasa de descuento (eje derecho). Se incluye una captura ampliada del entorno al escenario del caso base. La variación de la estructura final de la chacra con rd se presenta en la Figura 3.10b.

Como era de esperar, VPN es fuertemente dependiente de la tasa de descuento considerada. Sin embargo, lo que resulta más interesante es que no solamente varía numéricamente el valor de la variable objetivo, sino que también la solución a la que tiende el modelo cambia con este parámetro.

La captura incluida en la Figura 3.10a muestra que cuando rd es mayor al 19% el proyecto se vuelve no rentable. El valor de la tasa de descuento que hace que VPN sea igual a cero (ingresos y egresos descontados iguales) es conocido como la Tasa Interna de Retorno (*TIR*).

Por su parte, la Figura 3.10b muestra el cambio de la composición de variedades al final del horizonte de planeamiento con rd . Si la aversión al riesgo del productor es baja (baja tasa de descuento), las diferencias entre la participación de las variedades más rentables (CP y AF) y las restantes es amplia. Por el contrario, un escenario más conservador se obtiene cuando la percepción de riesgo aumenta. Esta tendencia está directamente relacionada a la cantidad de inversiones totales realizadas por el productor (línea de guiones en la Figura 3.10a), dado que las diferencias en la

estructura final se producen no porque con rd cambien las variedades por las que se opta invertir, sino porque al disminuir las inversiones, un mayor porcentaje de las plantaciones presentes al comienzo del horizonte de planeamiento permanecen hasta el final del mismo.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un modelo de optimización para asistir en el planeamiento de reestructuración de chacras de fruta de pepita. Si bien dicho modelo ha sido aplicado aquí a un caso particular, puede ser considerado una herramienta general ya que mediante la modificación de los parámetros de entrada posibilitaría representar una gran cantidad de estructuras diferentes. Adicionalmente, el mismo puede ser adaptado con relativa facilidad para ser utilizado como herramienta de toma de decisiones en sistemas similares (frutas de carozo, uva, cítricos, etc.). Por su parte, la incorporación explícita de financiamiento externo en la formulación de los flujos de dinero permite que el modelo pueda ser usado tanto por agencias gubernamentales para asesorar al sector privado y desarrollar políticas económicas estratégicas, como por compañías para optimizar la rentabilidad de su negocio.

El modelo fue probado en una chacra típica. Los resultados mostraron que desde el punto de vista de la densidad de plantación, hay una clara tendencia a invertir en plantaciones de alta densidad con una remoción temprana de las de baja densidad. Las plantaciones de densidad media fueron, en general, mantenidas en la chacra hasta que alcanzaron su máxima vida útil. En lo que respecta a variedades, las más rentables fueron plantadas con preferencia. El método de reinjertación fue empleado en varias ocasiones para permitir una rápida entrada en producción de estas variedades. No obstante, las restricciones del control de cosecha generaron estructuras heterogéneas ayudando a reducir los riesgos asociados a la oferta de un único producto. En cuanto a la posibilidad de acceder a financiamiento, ésta no afectó significativamente la estructura final de la chacra, pero sí tuvo un impacto importante en la velocidad de transición entre la estructura inicial y final.

En lo que respecta a los análisis de sensibilidad, la disponibilidad de mano de obra afectó tanto el nivel de rentabilidad como la estructura final de la chacra. La productividad semanal y la rentabilidad del negocio se vuelven objetivos conflictivos para grandes requerimientos productivos. En segundo lugar, mediante el análisis de sensibilidad sobre el presupuesto inicial se obtuvo un valor óptimo de este parámetro

más allá del cual un aumento en el monto de dinero inicial puesto a disposición del proyecto, no genera un aumento en los flujos de fondo acumulados equivalente. En consecuencia, la rentabilidad disminuye. Finalmente, el análisis de sensibilidad sobre la tasa de descuento, mostró que este parámetro tiene una fuerte influencia en las decisiones tomadas. Cuando la aversión al riesgo es baja, la cantidad de inversiones realizadas aumenta considerablemente, sobre todo en plantaciones de las variedades con mayor precio de venta en el mercado. Por el contrario, al aumentar la percepción del riesgo se obtienen escenarios más conservadores reduciendo significativamente la tasa de reconversión, por lo que un mayor porcentaje de la estructura inicial de la chacra permanece en ella hasta el final del horizonte de planeamiento.

Aunque los escenarios considerados aquí son en muchos sentidos una simplificación de la realidad, las tendencias generales que se observan en la actualidad en la región bajo estudio fueron reproducidas satisfactoriamente con el modelo propuesto.

Por otra parte, se debe destacar que las decisiones de reestructuración propuestas por el modelo a lo largo de un horizonte de planeamiento de 20 años no necesariamente deben ser implementadas en la práctica en su totalidad. La razón obvia es que la mayoría de los parámetros pueden variar significativamente en el mediano plazo (precio de venta de la fruta, costos de producción, etc.) volviendo obsoleta la solución original. Más bien, tiene sentido implementar la solución para los primeros años y luego volver a correr el modelo desde la condición resultante por otros 20 años con los datos actualizados. Este enfoque “rolling horizon” es la forma más intuitiva y sencilla de tratar con la incertidumbre inherente a este tipo de industria. También sería posible realizar estudios más sofisticados, incluyendo análisis de escenario y optimización estocástica.

Capítulo 4

Planeamiento táctico

4.1. Introducción

En este capítulo abordaremos el problema del planeamiento táctico de la cadena de suministro de la industria de la fruta. Se considera que la infraestructura de la CS es fija y se busca identificar la mejor forma de utilizar los recursos de producción, distribución y almacenamiento para dar respuesta a la demanda de un modo eficiente desde el punto de vista económico (Shah, 2005).

Si bien el modelado de CS es un campo desarrollado, no abundan las contribuciones realizadas en la industria alimenticia en general y para la industria de la fruta en particular, aun cuando ésta sea una actividad relevante a nivel mundial.

En el caso de la CS de la fruta, el problema presenta particularidades que fueron descritas oportunamente en el Capítulo 2. Por ejemplo, podemos mencionar que la disponibilidad de la producción, tanto cuantitativa como cualitativamente, depende de las condiciones de la naturaleza, como el clima y las plagas; es una actividad estacional; al tratarse de un producto perecedero hay riesgo de daño del producto incluso luego del procesamiento de la materia prima; y que la comercialización del producto no es solamente impulsada por la demanda; entre otros (Van Donk y otros, 2008; Verdouw y otros, 2010).

Según Van Donk y otros (2008), estas características dificultan la integración de los distintos participantes de la CS, sobre todo por parte de los productores de fruta con el resto de los integrantes que componen el sector. Por ejemplo, los productores generalmente buscan alcanzar elevados niveles de producción. Esto se logra dejando el fruto en la planta el mayor tiempo posible. Sin embargo, el fruto en la planta no

solamente crece, sino que también madura, por lo que se puede poner en riesgo su capacidad de conservación y, en consecuencia, verse imposibilitado posteriormente de acceder a los mercados de fruta fresca por la baja calidad del mismo. Es por esto que los encargados del procesamiento y la comercialización, priorizan el buen estado del fruto antes que el calibre. Este sencillo ejemplo pone de manifiesto la necesidad de una integración del proceso de suministro.

De estas particularidades, en este trabajo hemos dado especial énfasis a las tres a nuestro juicio más relevantes:

- i) En primer lugar, tanto la manzana como la pera son productos perecederos, por lo que con el paso del tiempo van perdiendo calidad. Esto hace que en condiciones normales tengan una vida útil inferior a la longitud del horizonte de planeamiento (un año). Superado este tiempo, no es posible comercializarlas como fruta fresca debido a que no reúnen las condiciones mínimas exigidas por el mercado (Shah y otros, 2005; Pahl y Vob, 2014). Con fines de modelado usualmente se asocia una vida útil máxima a los alimentos perecederos a pesar de que su duración depende de múltiples factores (Rong y otros, 2011; Pahl y Vob, 2014).

Esta condición acota las posibilidades de procesar, almacenar y comercializar el producto a una porción del horizonte de planeamiento. Para lograr extender los períodos de pos-cosecha se ha puesto énfasis en el empleo de técnicas de conservación y monitoreo de la temperatura a lo largo de la cadena (Verdouw y otros, 2010). En este sentido, la introducción de la tecnología de cámaras de atmósfera controlada es probablemente la que más éxito ha conseguido. Con esta técnica es posible almacenar la fruta hasta por 12 meses (Studman, 2001).

Entre los trabajos que consideran el carácter perecedero de los alimentos, Rong y otros (2011) propone un modelo de CS que explícitamente tiene en cuenta la degradación del producto durante el almacenamiento y el transporte en función del nivel de temperatura. Cuando la calidad del producto disminuye por debajo de un límite mínimo permitido, el mismo pasa a ser considerado descarte. El modelo es aplicado a un caso de estudio de la CS de los pimientos. Las decisiones que se toman incluyen volúmenes de producción, flujos de transporte, temperatura de almacenamiento y transporte.

En el mismo sentido, Pahl y Vob (2014) realiza una extensa revisión de la inclusión de restricciones del ciclo de vida de los productos dentro de los modelos de planeamiento de la producción y de CS. Distingue entre los productos cuya

funcionalidad se deteriora con el tiempo, tal como las frutas, los vegetales y la leche; y aquellos productos que no se degradan en sí mismos, pero su demanda se deteriora a medida que la percepción de utilidad de los clientes disminuye, tal como los productos de moda, o de alta tecnología, y productos cuya información pierde valor con el tiempo, como los diarios.

- ii) Estacionalidad. La materia prima para la elaboración de cada uno de los productos –conformados por las diferentes variedades de manzana y pera– podrá adquirirse únicamente durante el lapso de cosecha de la variedad en cuestión (Verdouw y otros, 2010). Como vimos en el Capítulo 2 cada variedad de fruta es recolectada durante un período acotado diferente. Adicionalmente, la duración de cada uno de los períodos de recolección puede diferir (Figura 2.3).
- iii) Finalmente abordaremos la cuestión de la demanda. En general las CS operan como sistemas “traccionados” por las órdenes de los clientes (en inglés se conocen como pull systems) (Perea-López y otros, 2003). Esto produce un flujo de información en sentido inverso al flujo de materia hacia los centros de distribución, almacenes, plantas de procesamiento, hasta finalmente alcanzar a los proveedores de materia prima (Beamon, 1998; Subramanian y otros, 2013). En una CS de este tipo, todos los actores involucrados deben responder a la demanda en tiempo y forma de una forma económicamente efectiva (Cecere y otros, 2004).

La CS de la manzana y la pera, sin embargo, es un sistema “empujado” por la producción de fruta en las chacras (push system en inglés). Esto determina en primera instancia la disponibilidad de productos para la posterior comercialización (Masini y otros, 2007). En consecuencia, se debe comercializar no solamente la fruta que es solicitada por los clientes en cada temporada, sino también el volumen de fruta de menor calidad que necesariamente se genera para poder cumplir con dichas órdenes. De esta forma, el flujo de información en este negocio se da en ambos sentidos (Verdouw y otros, 2010). Por un lado, hay que procurar proporcionar la fruta que ha pedido el cliente. Por otro, hay que tratar de colocar en el mercado el excedente de fruta.

Para poder captar esta última particularidad de la actividad, decidimos plantear un problema de optimización multi-objetivo. En lo que respecta al modelado de CS con estos métodos, puede encontrarse una amplia variedad de trabajos en la literatura. Con este tipo de enfoques se busca, en general, modelar las preferencias de los encargados de tomar las decisiones –el término preferencia entendido como la

importancia relativa dada a las diferentes funciones objetivo.

Los métodos de optimización multi-objetivo pueden ser divididos en tres categorías en función del momento en el que se establece el orden de preferencia de los diferentes objetivos: métodos con articulación previa de las preferencias, implican asignar un orden de importancia a las funciones objetivo antes de resolver el problema de optimización; métodos con articulación posterior de las preferencias, en los cuales se selecciona una única solución de un conjunto de soluciones matemáticamente equivalentes; y métodos sin articulación de preferencias (Marler y Arora, 2004).

Hay una gran variedad de métodos de resolución, no obstante, en gran parte de los trabajos publicados se ha optado por el método ε -constraint para resolver los problemas de optimización formulados (Guillén-González y otros, 2005), el cual pertenece a la primera de las categorías mencionadas anteriormente. Este método consiste básicamente en optimizar únicamente la función objetivo considerada más importante, utilizando las restantes como restricciones adicionales del modelo. Este método resulta de utilidad cuando se busca analizar cómo afecta a la función objetivo más importante la variación de las cotas impuestas sobre los demás objetivos. Las curvas resultantes de la aplicación de este método son conocidas como curvas de Pareto.

Entre los trabajos que optaron por la utilización de este método se puede mencionar a Sabri y Beamon (2000), que desarrollaron un modelo multi-objetivo integrado de planeamiento estratégico y operativo, considerando los costos, el nivel de atención al cliente y la flexibilidad en las entregas como objetivos. Por su parte, Guillén-González y otros (2005) presentan un modelo de dos etapas MILP estocástico de diseño de CS. Considera incertidumbre en la demanda y tiene como objetivo maximizar el valor esperado del valor presente neto, teniendo en cuenta la satisfacción de la demanda y el riesgo financiero. Liu y Papageorgiou (2013), mediante un modelo multi-objetivo MILP de CS global, estudia el planeamiento de producción, distribución y almacenamiento. Utiliza el método ε -constraint minimizando el costo e incluyendo restricciones sobre el nivel de incumplimiento de la demanda y los tiempos máximos de entrega del producto. Una vez conseguidas las curvas óptimas de Pareto, utiliza el método lexicográfico mini-max para seleccionar cuál de las soluciones óptimas de Pareto implementar, buscando una relación justa entre el costo y la capacidad de reaccionar a las necesidades de los clientes. En otros trabajos (Guillén-González y Grossmann, 2010; Kostin y otros, 2011b; Mele y otros, 2011), se ha utilizado este método para estudiar la relación existente entre el beneficio

económico y el impacto ambiental.

Sin embargo, el método que mejor se adapta a los fines de nuestro estudio es el método lexicográfico, el cual también entra dentro del conjunto de métodos con articulación previa de las preferencias. Con este método, las funciones objetivo se arreglan en orden de importancia y se resuelven secuencialmente los problemas una función objetivo a la vez. Más adelante en el cuerpo del capítulo se explicará el método en detalle.

En [Sawik \(2007\)](#) y [Sawik \(2009\)](#), el método lexicográfico es utilizado para resolver en múltiples etapas un problema de scheduling asignando prioridad a diferentes funciones objetivo. En [Sawik \(2007\)](#) se presenta un problema en dos etapas en el que en el primer nivel se busca maximizar la satisfacción del cliente. Una vez determinados los períodos en los que se realizarán las entregas, se busca en una segunda etapa minimizar las fluctuaciones en los esquemas de producción para disminuir de esta forma el costo de producción unitario. Por su parte, en [Sawik \(2009\)](#) se propone un modelo de scheduling jerárquico de tres niveles con este método. En primer lugar se busca cumplir con todas las órdenes de los clientes minimizando el inventario total de partes y productos terminados. Posteriormente, se realiza el scheduling del ensamblado y entrega de los productos a los clientes, y luego se determina el scheduling de la fabricación y envío de las piezas para ensamble. Otro grupo de autores ([Mavrotas, 2009](#); [Pishvaei y otros, 2012](#); [De-León Almaraz y otros, 2013](#)), han utilizado el método lexicográfico como complemento al método ε -constraint. En estos trabajos, el método lexicográfico es utilizado para determinar los extremos de las curvas de Pareto. Posteriormente, los puntos intermedios de la curva se obtienen variando el valor de ε entre los extremos previamente hallados.

Por otro lado, específicamente para la CS de la industria de la fruta se pueden mencionar los siguientes antecedentes.

En [Broekmeulen \(1998\)](#) se propone un modelo táctico para mejorar la efectividad de las operaciones en centros de distribución de frutas y vegetales. El objetivo es proveer la asignación óptima de los productos perecederos a las diversas zonas de almacenamiento dentro del centro de distribución para minimizar la pérdida de calidad.

En [Blanco y otros \(2005\)](#) se presenta un modelo táctico detallado de una planta de empaque en la industria de la fruta. Aquí se propone un modelo de planeamiento multi-período con un horizonte de tiempo anual y se lo utiliza para predecir de forma óptima los flujos e inventarios de fruta dentro de una planta típica dada su capacidad

de procesamiento y almacenamiento máxima.

En [Ortmann \(2005\)](#) se describe en detalle la SC de la fruta fresca de exportación para el caso de Sudáfrica y se proponen modelos para optimizar el negocio. El modelo resultante es del tipo LP y tiene por objetivo maximizar el flujo de fruta y minimizar los costos de transporte. El estudio apunta a estudiar la capacidad de infraestructura e identificar cuellos de botellas en la red, más que a proveer una herramienta de toma de decisiones para operadores.

[Masini y otros \(2007\)](#) presenta un modelo táctico de cadena de suministro de la fruta, extensión del trabajo presentado en [Masini y otros \(2003\)](#), para ser utilizado en las instancias de negociación de la empresa, antes de dar comienzo a la nueva temporada. Con los pronósticos de producción, el modelo persigue maximizar los beneficios para la infraestructura disponible procurando identificar los merados más promisorios. El modelo resultante es LP multi-período con un horizonte de planeamiento anual dividido en semanas.

Teniendo en cuenta lo dicho hasta aquí, se propone como objetivo del capítulo estudiar los efectos producidos por cambios en la infraestructura de la CS de la manzana y la pera en el beneficio económico y en la capacidad de dar respuesta a la demanda. Para esto, como se dijo anteriormente, se modeló el sistema como un problema de optimización multi-objetivo, resuelto mediante la utilización del método lexicográfico.

4.2. Descripción del problema

En esta sección se explica en términos generales el modelo de planeamiento formulado. La versión detallada del modelo se presenta en el Apéndice D. Parámetros y Nomenclatura se reportan en los Apéndices E y F, respectivamente.

4.2.1. Estructura de la cadena de suministro

La estructura de la cadena de suministro de la manzana y la pera queda definida a partir de la interacción de los distintos nodos que conforman los sectores de producción primaria –cosecha de la fruta en chacras–; procesamiento –clasificación, acondicionamiento y empaque de la fruta fresca–; conservación frigorífica; transporte y comercialización (Figura 4.1).

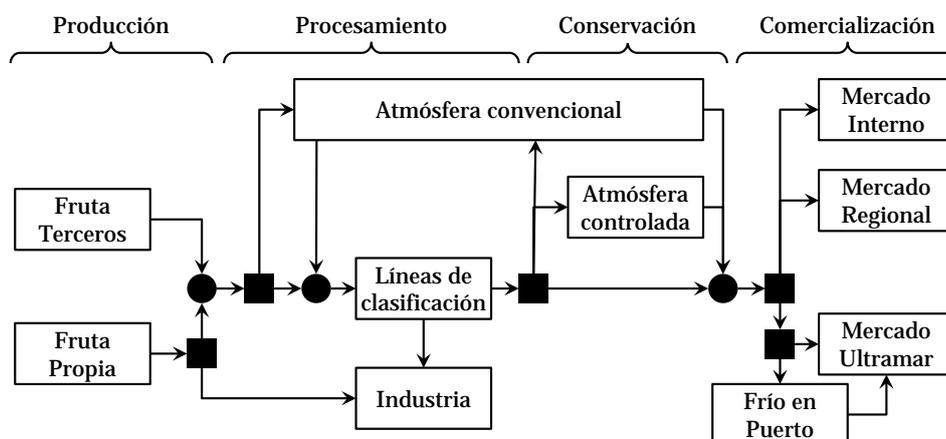


Figura 4.1 – Esquema de la estructura de la cadena de suministro de la industria de la fruta modelada.

El sector de producción está compuesto por los nodos de provisión de fruta fresca de chacras propias y de proveedores. En las chacras propias se genera una primera corriente de descarte, la cual está constituida por fruta que no cumple los requerimientos mínimos de calidad para ser comercializada como fruta fresca. La misma es enviada al sector de industrialización (jugos). Recordamos aquí que dado el carácter estacional de la actividad, estos nodos participarán activamente del negocio únicamente durante los períodos de recolección de fruta de las diferentes variedades comercializadas (Figura 2.3).

La fruta fresca, propia y adquirida a terceros, es enviada a los galpones de empaque, los cuales constituyen el principal nodo de procesamiento. La misma puede ser procesada en caliente en las líneas de clasificación, o bien ser almacenada en frío para su posterior procesamiento.

Para la conservación de la fruta se han considerado las dos tecnologías típicas utilizadas en la región: el almacenamiento en cámaras de frío convencional (FC) y en cámaras de atmósfera controlada (AC), oportunamente descritas en la Sección 2.2.3. En las primeras se puede almacenar tanto fruta sin clasificar como procesada, mientras que en las segundas únicamente se almacena fruta clasificada.

De lo dicho anteriormente se desprende que la fruta que ingresa a la etapa de clasificación puede provenir directamente de la chacra o haber sido almacenada en frío previamente. Aquí, la fruta es clasificada de acuerdo a la cantidad de defectos y tamaño en tres calidades diferentes: primera, segunda y tercera. A su vez, como resultado del proceso de clasificación se genera una segunda corriente de descarte con

fruta que no cumple los requerimientos mínimos de calidad para ser comercializada en fresco. Esta fruta también es enviada a industria.

Una vez clasificada, la fruta puede ser enviada a almacenamiento, en cualquiera de los dos tipos de frío considerados, o bien ser comercializada directamente.

Como se observa en la Figura 4.1, la fruta comercializada puede provenir de las líneas de clasificación, o bien de las cámaras frigoríficas. Se han considerado tres posibles mercados de destino: mercado interno (**MI**), regional (**Brasil**) y ultramar. Este último está discriminado a su vez en: Unión Europea (**UE**), Estados Unidos (**USA**) y **Rusia**.

Las ventas por vía terrestre (mercado local y regional) se realizan durante todo el año, mientras que la comercialización a ultramar sólo se lleva a cabo durante la primera parte del año, cuando la producción en el Hemisferio Norte es nula.

4.2.2. Obtención de materia prima

Los volúmenes de producción de fruta propia son proporcionados al modelo como datos (Tabla E.1). Junto con el volumen total, es necesario proporcionar el calendario de cosecha de cada variedad (Tabla E.1). Asimismo, en cada semana del período de cosecha de cada variedad, se recolecta un determinado porcentaje de la producción total (Tabla E.3). Este porcentaje cambia año a año y depende de varios factores, entre los que se puede mencionar:

- el calibre de la fruta. Si el tamaño del fruto no alcanza los niveles adecuados para su comercialización en fresco, puede decidirse dejarlo un tiempo más en la planta para que alcance el tamaño deseado.
- la presión interna del fruto. Por el contrario, si la presión del fruto es baja, lo cual es un signo de madurez, el productor se ve obligado a recolectar su producción porque se pone en riesgo la posterior comercialización en fresco, o bien su período de conservación en frío puede verse disminuido.

En el caso de que el tamaño de la fruta sea chico y a su vez esté madura, debe recolectarse aunque no alcance a tener el calibre necesario para acceder a los mejores mercados.

Por último, para completar la información necesaria referida a la producción propia, es necesario suministrar el porcentaje de descarte generado en la chacra por variedad (en la página 183).

En lo que respecta a la fruta de terceros, la misma es modelada como una disponibilidad de fruta para complementar la producción propia. Es el modelo el que debe decidir si hace uso o no de esa fruta. Para evitar la compra de cantidades muy pequeñas, esta variable fue definida semi-continua. Pudiendo tomar un valor nulo, o en caso contrario estar acotado a valores máximos y mínimos.

4.2.3. Líneas de clasificación de fruta fresca

En el sector de procesamiento de la fruta (descrito en la Sección 2.2.2), se ha considerado que puede haber más de una línea de clasificación, cada una de las cuales trabaja de forma independiente.

Cada línea de clasificación posee una capacidad instalada mínima y máxima asociada a la velocidad de la cinta, la cantidad de platillos que posee, y el porcentaje de ocupación de los mismos. Sin embargo, la capacidad de procesamiento diaria queda definida en función de la cantidad de turnos de mano de obra contratados.

Asimismo, se ha impuesto la restricción de que únicamente es posible trabajar una variedad de fruta por día en cada línea de clasificación. En la práctica, cada cambio de variedad requiere ajustes en las máquinas de clasificación, lo que se traduce en tiempo ocioso y la consecuente pérdida de producción, razón por la cual se trata de minimizar la cantidad de cambios realizados a lo largo de la temporada.

En lo que se refiere a la mano de obra, puede trabajarse hasta con tres turnos diarios, los dos primeros de ocho horas, y el tercero de siete. Los convenios laborales, imponen además que, en caso de contratarse un nuevo turno, se le debe asegurar un plazo mínimo de trabajo (15 días).

4.2.4. Conservación en cámaras de frío convencional (FC)

Como se dijo anteriormente, en este tipo de cámaras es posible almacenar tanto fruta sin procesar como procesada. Sin embargo, no es deseable almacenar los dos tipos de fruta en una misma cámara simultáneamente, por un lado, para evitar que fruta clasificada entre en contacto con fruta que puede estar en mal estado y, por otro, porque la fruta que llega de las chacras tiene una temperatura mayor a la que ya ha sido clasificada, lo que puede alterar la temperatura de la segunda afectando su estado de maduración.

Otra característica asociada a la operatoria de las cámaras de FC, es que no se

las opera simultáneamente con manzanas y peras, puesto que las condiciones de almacenamiento de ambas especies es diferente.

Es necesario mencionar que, si bien estas dos últimas particularidades son de hecho limitaciones en la práctica, no han sido incluidas en la formulación de este problema cuyo principal interés es orientar las decisiones de mayor alcance.

Finalmente, dado que la fruta dentro de las cámaras de FC continúa su proceso de maduración, la misma no puede permanecer dentro de ellas por tiempo indeterminado. Es por esto que se ha considerado un lapso máximo de conservación para cada una de las variedades. El mismo es función de la fecha de finalización de recolección de la variedad (Tabla E.1) más un lapso predeterminado. Si bien esta es una aproximación, representa, al menos cualitativamente, lo que ocurre en la operatoria de este tipo de cámaras. Una vez alcanzado el límite de conservación, el remanente de fruta dentro de la cámara necesariamente debe ser comercializada.

4.2.5. Conservación en cámaras de atmósfera controlada (AC)

La operatoria de las cámaras de AC es radicalmente diferente a la de las cámaras de FC, ya que son utilizadas específicamente para almacenar la fruta por un período prolongado. Para poder representar adecuadamente esta actividad fue necesario incluir en el modelo un gran número de variables y ecuaciones.

El modo de operación de las cámaras de AC se muestra cualitativamente en la Figura 4.2. El mismo consta de los siguientes items: llenado, sellado, apertura y vaciado. Con estas operaciones quedan definidas cinco etapas que caracterizan las distintas fases del proceso.

En una primera etapa la cámara está vacía y disponible para utilizarse (Etapa I, Figura 4.2). Esta es la única de las 5 etapas que puede extenderse a lo largo de toda la longitud del horizonte de planeamiento (en caso que la cámara no sea utilizada).

La segunda etapa (Etapa II, Figura 4.2) corresponde al llenado de la cámara y queda delimitada por el momento en el que la cámara comienza a llenarse y el momento en el que la cámara se cierra. Aquí los flujos de entrada a la cámara serán no nulos y restringidos por una cota máxima. A su vez, la duración de esta etapa está limitada por un valor máximo, básicamente porque la fruta continúa con su proceso natural de maduración hasta tanto la cámara no sea sellada y su atmósfera modificada.

La tercera fase (Etapa III, Figura 4.2) corresponde a la de conservación dentro de

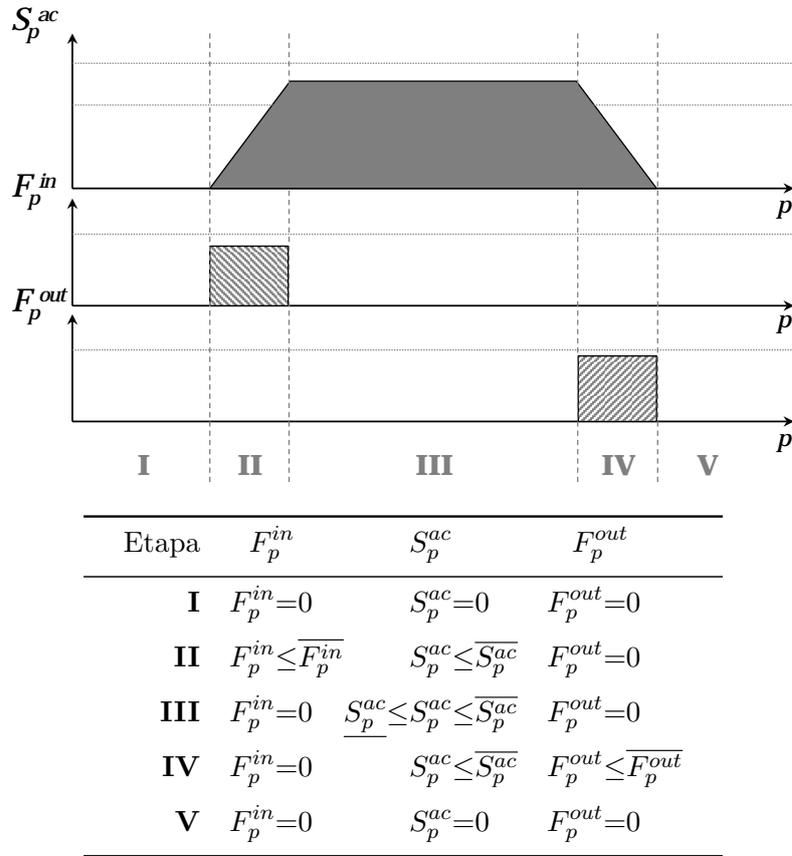


Figura 4.2 – Esquema del funcionamiento de las cámaras de AC.

la cámara. Comienza cuando la cámara es sellada y finaliza en el momento en el que la cámara se abre para comenzar a sacar la fruta de su interior. Dado que los flujos de entrada y salida de fruta correspondientes a esta etapa son nulos, el stock dentro de la cámara es constante. Asimismo, éste debe estar dentro de niveles mínimos y máximos preestablecidos. Además la longitud de este período posee una cota mínima, la cual indica la cantidad mínima de días que la fruta debe permanecer dentro de la cámara.

La cuarta etapa (Etapa IV, Figura 4.2) es la de vaciado, en la cual la fruta se extrae de la cámara para ser comercializada. En este caso, el flujo no nulo corresponde al de salida. Al igual que en la etapa de llenado (Etapa II, Figura 4.2), la longitud de este período tiene una cota máxima que establece el tiempo máximo con el que se cuenta para extraer la totalidad de la fruta del interior de la cámara. Esto se debe a que una vez que la cámara se abre, el fruto retoma su proceso de maduración.

La fase final (Etapa V, Figura 4.2) comprende desde el día en el que la cámara queda vacía hasta el final del horizonte de planeamiento. Aquí, al igual que en la primera

etapa, tanto los flujos de entrada y de salida, como el stock de fruta dentro de las cámaras son nulos. En este caso no hay restricciones sobre la duración de la etapa, pero sí se establece que la cámara debe quedar vacía antes de que se llegue al final del horizonte.

De esta forma queda descrita la operatoria de las cámaras de AC. Se puede destacar que en estas cámaras en ningún momento coincidirán los flujos de entrada y de salida, así como tampoco se puede dar que después de un flujo de salida haya uno nuevo de entrada (hecho que sí es posible en cámaras de FC). Las etapas se dan en forma secuencial y tienen un orden preestablecido.

Por último, al igual que en el caso de las cámaras de FC, no es posible almacenar simultáneamente manzanas y peras, por las razones enunciadas anteriormente en la Sección 4.2.4.

4.2.6. Comercialización

En lo que a comercialización se refiere, para que la venta pueda llevarse a cabo se deben cumplir una serie de requisitos que dependen del mercado de comercialización.

En primer lugar, debe considerarse que la calidad mínima de la fruta exigida por cada uno de los mercados difiere. La comercialización a ultramar (UE, USA y Rusia) únicamente emplea fruta de primera calidad; el mercado regional acepta fruta de primera o segunda calidad; y el mercado interno recibe todas las calidades.

Además, cada mercado acepta solo determinadas variedades, por lo que el hecho de cumplir con la calidad mínima exigida no es condición suficiente para realizar la venta.

En la Figura 4.3 se presentan las opciones de comercialización del sistema estudiado. Como puede observarse, cuanto mayor es la calidad de la fruta, más opciones de colocación tiene. Cuando la calidad de la fruta disminuye, son menos los mercados en los que dicha fruta puede ser comercializada. Puede notarse también que muchas variedades de segunda calidad, al no ser aceptadas en Brasil, pueden ser únicamente comercializadas en el mercado interno. Finalmente, toda la fruta de tercera calidad tiene como único destino posible al mercado interno.

Los lotes de fruta comprometidos son transportados a los mercados de destino (regional y local) o al puerto (ultramar) con camiones. Dependiendo del mercado de destino las capacidades del camión son diferentes (Sección 2.2.6). Los camiones utili-

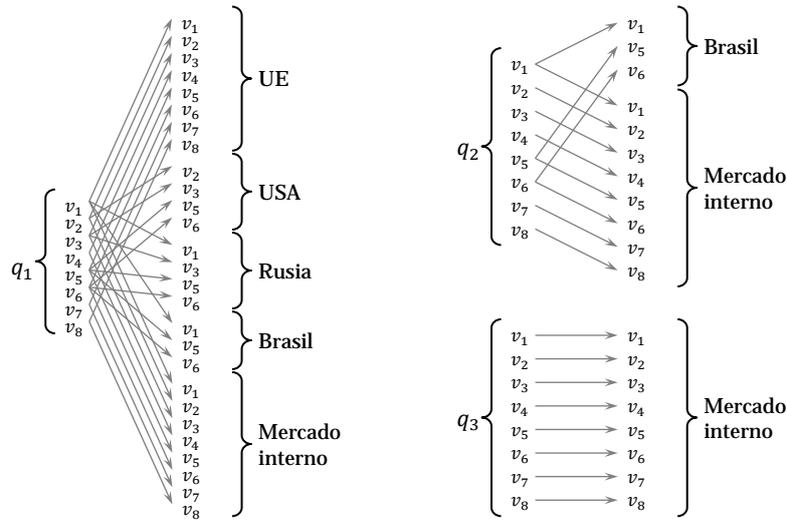


Figura 4.3 – Opciones de comercialización permitidas considerando calidad-variedad-mercado (q : calidad, v : variedad).

zados para comercializar con Brasil poseen una capacidad mayor a la de los utilizados para los otros mercados. En este trabajo, se considera que hay una disponibilidad de camiones máxima por mercado y por período.

En lo que respecta a la comercialización por vía terrestre (Brasil y mercado interno), la venta se considera realizada en el momento en el que la fruta sale del galpón de empaque. El caso de la comercialización por ultramar, tiene un tratamiento particular que será explicado a continuación.

Comercialización Ultramar

La Figura 4.4 representa la situación modelada para este tipo de comercialización.

Los camiones cargados con la fruta destino a ultramar dejan el galpón de empaque y se dirigen al puerto. Al llegar, pueden cargar directamente la fruta al barco, en caso de que el barco se encuentre en el puerto, o guardarla en el frigorífico del puerto hasta su arribo. Las líneas punteadas en gris de la Figura 4.4 indican procesos que pueden llevarse a cabo únicamente cuando el barco se encuentra en el puerto. Las fechas estimadas de arribo y de partida de los barcos al puerto (ETA y ETD por sus siglas en inglés, respectivamente) están preestablecidas en un cronograma de embarques (Tabla E.6).

Puesto que no todos los mercados a ultramar aceptan todas las variedades (ver Figura 4.3), es necesario suministrar también el destino del barco (página E.3). Por

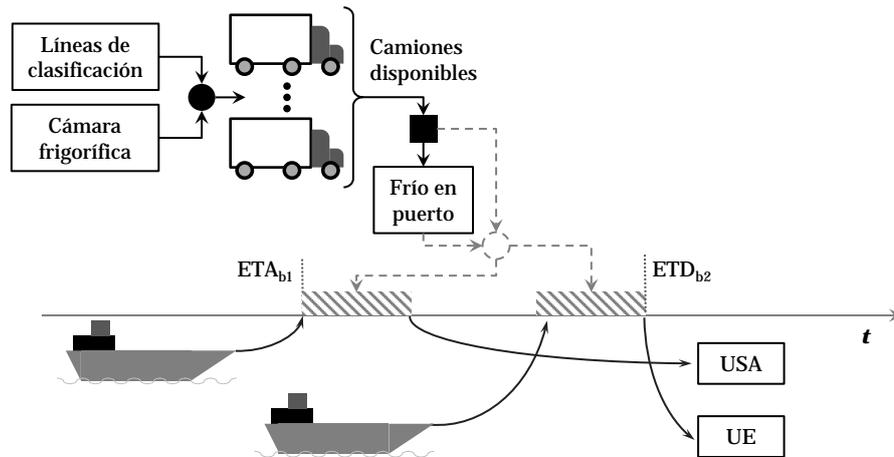


Figura 4.4 – Esquema de transporte, almacenamiento en puerto y comercialización a ultramar.

consiguiente, a cada barco se cargarán solamente variedades que sean aceptadas en el mercado de destino. De lo contrario, la fruta deberá permanecer en frío hasta tanto arribe un barco con destino a un mercado en el que sea aceptada.

Por su parte, el esquema de la Figura 4.4 considera la situación que se plantea al contar con un único puerto para despachar la fruta. En el modelo, se ha desarrollado una formulación general que permite la inclusión de varios puertos. Si este es el caso, es necesario suministrar el cronograma de embarques de los diferentes puertos para que el modelo pueda decidir a qué puerto conviene enviar la fruta.

Como se mencionó anteriormente, en la comercialización por vía terrestre, la venta se considera realizada al momento en el que ésta deja el galpón de empaque. En este caso, la venta se materializa en el momento en el que el barco deja el último puerto argentino y se dirige a destino.

4.2.7. Aspectos económicos

Las distintas actividades enumeradas hasta aquí generan costos que son necesarios cuantificar para evaluar el desempeño económico del sistema. Los costos considerados se detallan a continuación (Sección E.4).

- i) En primer lugar aparece el costo de la materia prima, tanto propia como de terceros. Estos son función de la variedad y del volumen producido –en caso de tratarse de fruta propia–, o del volumen comprado –si se trata de fruta de terceros–.

- ii) También ha sido considerado el costo de procesamiento y empaque, discriminado por especie y por mercado de destino. Esto es así dado que los envases utilizados en el empaque dependen básicamente de estos dos parámetros. Por consiguiente, el mismo es directamente proporcional al volumen de venta a los distintos mercados considerados.
- iii) Sigue el costo de mano de obra, el cual es calculado en función de la cantidad de turnos contratados para operar las líneas de empaque.
- iv) Se tiene en cuenta un costo de amortización, el cual posee una componente fija y otra variable. La primera, considera la amortización del edificio del empaque y de las máquinas utilizadas para la clasificación y almacenamiento de la fruta. La segunda, incluye la amortización de los bins utilizados para transportar la fruta y es función del volumen de fruta empaqueado.
- v) Los costos de almacenamiento de la fruta, tanto en FC como en AC, están discriminados en un costo variable, función del stock de fruta dentro de las cámaras, y un costo fijo, que se cuantifica en caso de que haya fruta dentro de las cámaras.
- vi) Se genera un costo de logística y comercialización, es función del mercado de destino e incluye también el costo de transporte. Junto con éste se calcula el costo de la utilización de los recursos de frío del puerto, como función del stock de fruta almacenada allí.
- vii) Finalmente, se consideran gastos generales que incluyen todos aquellos gastos que son función del volumen comercializado. Incluyen actividades como gastos de tratamiento y traslado de la fruta, limpieza, gastos administrativos, etc.

Por su parte, los ingresos económicos surgen de la venta de la fruta fresca y del descarte generado, tanto en las chacras propias como en las líneas de clasificación. Los primeros, se calculan como el producto entre precio de venta y el volumen de fruta comercializado. Los perfiles de precios anuales de fruta fresca están discriminados por mercado de destino y por variedad (Figura E.1). El segundo, se calcula como el producto entre el precio del descarte y el volumen correspondiente.

Todos los valores numéricos necesarios para calcular las distintas componentes de costos y los ingresos fueron calculados haciendo uso de la información publicada en el Primer Informe del Observatorio Frutícola (Storti, 2011). Dicha información se presenta en el Apéndice E.

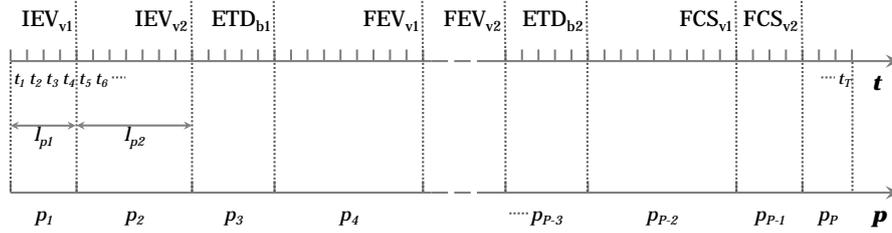


Figura 4.5 – Esquema de definición del horizonte de planeamiento táctico en función de parámetros del modelo operativo. t corresponde a los períodos del modelo de planeamiento operativo, p a los períodos del modelo de planeamiento táctico, l_p a la longitud en días de cada uno de los períodos del planeamiento táctico.

4.2.8. Subdivisión del horizonte de planeamiento

Los resultados que se reportan en este capítulo fueron obtenidos mediante un modelo de planeamiento táctico, construido sobre la base de un modelo operativo que será tratado más adelante (Capítulo 5).

La principal diferencia entre uno y otro radica en la cantidad de períodos en el que se ha subdividido al horizonte de planeamiento. En el modelo operativo se ha utilizado una discretización diaria del horizonte, mientras que en el modelo táctico los distintos períodos están definidos en función de hitos particulares que tienen lugar a lo largo de la temporada frutícola y por lo tanto no son de longitud uniforme.

Los hitos seleccionados para dividir el horizonte de planeamiento son:

- Fecha de inicio de recolección de la variedad (IEV_v).
- Fecha de finalización de recolección de la variedad (FEV_v).
- Fecha límite de almacenamiento de cada variedad en FC (FCS_v).
- Fecha de partida del barco del puerto (ETD_{bh}).
- Fecha mínima de extracción de cada variedad de AC¹ (OCA_{vp}).

Con fines ilustrativos, en la Figura 4.5 se muestra la forma en la que el horizonte de planeamiento del modelo táctico se define en función de los parámetros mencionados, para un caso hipotético con 2 variedades de fruta, 2 barcos y sin cámaras de AC.

Para el caso de estudio analizado en este capítulo, quedan definidos 22 períodos de

¹Este parámetro surge por la exigencia de estadía mínima de las frutas dentro de las cámaras de AC. Una determinada variedad, no podrá extraerse de la cámara antes de que hayan pasado los días de estadía mínimo exigidos después de iniciado su período de recolección.

acuerdo a los criterios mencionados. Para completar la longitud total del horizonte (365 días), se definen adicionalmente 8 períodos de 15 días, y un último período de 11 días. De esta forma, en el modelo táctico, el horizonte de planeamiento queda descrito por 34 períodos.

4.2.9. Objetivos del planeamiento táctico

Funciones objetivo

Para este estudio se han considerado dos funciones objetivo diferentes. Una es el incumplimiento de la demanda a minimizar, y la otra, es el beneficio económico a maximizar.

Para poder realizar el cálculo de la primera, se suministra al modelo los perfiles de demanda de los diferentes mercados y se calculan tanto las desviaciones positivas como negativas de los volúmenes comercializados con respecto al demandado. No obstante, en la función objetivo se incluyen únicamente las desviaciones negativas.

Por su parte, el beneficio económico se calcula como la diferencia entre los ingresos totales por ventas y los costos totales generados por las actividades consideradas.

Confección de los perfiles de demanda

En este apartado se detallará el procedimiento realizado para la elaboración de los perfiles de demanda suministrados al modelo (Tablas E.14 y E.15). El principal objetivo es definir perfiles representativos de la operatoria del sistema a partir de información pública del sector.

La fuente de información principal es el Anuario Estadístico 2011 de Egreso de Peras y Manzanas de la Región Protegida Patagónica (Funbapa, 2012). Allí se reportan los volúmenes declarados de fruta que salieron de la Región Protegida Patagónica hacia los diferentes destinos considerados durante el año 2011. Dicha información, está discriminada por especie y por mes para el caso de los mercados de exportación, mientras que se discrimina por variedad y por mes para el mercado interno.

El primer paso en la confección de los perfiles de demanda consistió en dividir cada uno de los valores mensuales reportados por el volumen total de fruta comercializado ese año, de forma tal de obtener nuevos perfiles expresados como fracción en lugar de toneladas.

Posteriormente, fue necesario expresar las demandas en unidades de tiempo correspondiente a los períodos de planeamiento táctico adoptados. Para esto, primero se calculó una fracción equivalente diaria dividiendo la fracción mensual por la cantidad de días del mes.

A continuación, con todas las fracciones diarias equivalentes, fue posible calcular las fracciones relacionadas al planeamiento táctico sumando todos los valores diarios relacionados a un mismo período de planeamiento táctico. Finalmente, los valores expresados en fracción, se pasaron a volumen multiplicándolos por la producción total de fruta en las chacras propias. Así se obtuvieron los perfiles de demanda en volumen escalados a nuestro caso de estudio.

Método de resolución

El modelo descrito se utilizará para evaluar cómo cambios en diferentes sectores de la infraestructura de la CS afectan a la capacidad de responder a los perfiles de demanda y al nivel de rentabilidad.

Como se dijo anteriormente, para llevar a cabo el análisis se utilizó el método de optimización multi-objetivo lexicográfico, el cual consiste en establecer un orden de prioridad a las diferentes funciones objetivo y resolver de forma secuencial los problemas de optimización agregando como restricción el valor óptimo de la variable objetivo de la jerarquía superior en cada iteración.

Para nuestro problema, hemos asignado mayor prioridad al nivel de incumplimiento (δ^-), por lo que en la primera iteración se minimiza el valor de esta variable. Posteriormente, se restringe el valor de dicha variable al valor mínimo alcanzado y se maximizan los beneficios (BEN). En sendos problemas de optimización, la función objetivo está sujeta al MPT completo (Ecuaciones D.1 a D.81). El fundamento de asignar mayor prioridad al cumplimiento de la demanda que al beneficio de la operatoria apunta a realizar una distribución realista de flujos a lo largo de la temporada. Cabe enfatizar que se trata de una demanda de “referencia” que sirve para guiar al complejo segmento comercial de la actividad.

PASO 1

$$\text{mín } \delta^- \quad (4.1)$$

$$s.t \quad \text{D.1–D.81}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{PASO 2} \\
 & \text{máx } BEN \tag{4.2} \\
 & \text{s.t } \delta^- = \delta^{-*} \\
 & \text{D.1–D.81}
 \end{aligned}$$

El modelo formulado es del tipo determinístico multi-período MILP, fue implementado en la plataforma de modelado y optimización GAMS 23.0 (Brooke y otros, 1988) y resuelto con CPLEX 11.2 (GAMS, 2009). Se utilizó como criterio de convergencia para todos los escenarios estudiados un gap relativo del 1%. Para resolver los casos de estudio que serán presentados a continuación fue utilizada una computadora con procesador Intel©Core™ 2 Quad Q8200 @ 2.33 GHz con 2.96 GB de memoria RAM.

4.3. Casos de estudio

Para estudiar cómo variaciones en la estructura de la cadena de suministro permiten adecuarse a los perfiles de demanda y a su vez cómo se ve afectado su nivel de rentabilidad, se realizaron los análisis de escenario que se detallan a continuación:

- i) Análisis de la capacidad de frío: Variación de la cantidad de cámaras de conservación de frío convencional y atmósfera controlada. La cantidad de cámaras de frío convencional se cambió de 1 a 5, y la de atmósfera controlada se de 1 a 6, quedando definidos un total de 30 escenarios.
- ii) Análisis de la capacidad de empaque: Variación de la cantidad de líneas de clasificación y empaque. La cantidad de líneas de empaque se varió de 1 a 4.
- iii) Análisis de la capacidad de transporte: Variación de la disponibilidad diaria de camiones. La cantidad de camiones diaria se varió de 1 a 7.

Estos análisis tienen por objetivo identificar la mejor solución operativa dada una estructura de la CS. Alternativamente puede interpretarse como un estudio tendiente a diseñar la CS en lo que respecta a capacidad de almacenamiento, empaque y transporte. La utilización del método lexicográfico permite, en primer lugar, identificar la capacidad de una dada estructura para cumplir con la demanda. Una vez definido el nivel de incumplimiento mínimo, se obtiene la rentabilidad que se puede alcanzar para ese nivel de incumplimiento. De esta forma, los beneficios obtenidos para los

diferentes escenarios incluyen el efecto no solo de la variación en la estructura, sino también el de honrar estrictamente el mínimo nivel de incumplimiento.

Para todos los análisis planteados fue definido un caso base con una infraestructura conformada por los siguientes elementos:

- Especies de fruta (e): Las especies consideradas son 2: manzana y pera.
- Variedades de fruta (v): Han sido consideradas 8 variedades, 4 de manzana (Red Delicious, Gala, Granny Smith y Cripp's Pink) y 4 de pera (William's, Packam's Triumph, D'Anjou y Abate Fetel).
- Cantidad de períodos del horizonte de planeamiento táctico (p): Comprende 34 períodos.
- Líneas de clasificación (l): La cadena modelada posee 2 líneas de clasificación de fruta.
- Turnos de trabajo (s): La cantidad de turnos de trabajo que pueden ser contratados por período son 3.
- Plazo mínimo de contratación (J): El período mínimo de contratación es de 15 días.
- Calidades de fruta (q): La fruta que entra a las líneas de clasificación es distinguida entre 3 calidades diferentes: primera, segunda y tercera.
- Puertos de comercialización a ultramar (h): Es considerado que la fruta es enviada a los mercados de ultramar a través de un único puerto.
- Cámaras de almacenamiento de frío convencional (c): Hay un total de 2 cámaras de FC.
- Cámaras de almacenamiento de atmósfera controlada (a): Son 3 cámaras de AC.
- Capacidad de transporte: 4 camiones diarios.
- Mercados de comercialización (m_3): La fruta puede ser comercializada en 5 mercados diferentes. 3 correspondientes a ultramar (m_2 : La Unión Europea, Rusia y Estados Unidos), Brasil y MI.

Toda la información restante suministrada al modelo se encuentra detallada en el Apéndice E, mientras que en el Apéndice F se presenta la nomenclatura utilizada. En la Tabla 4.1 se presentan las dimensiones del problema para el caso base. Por su

Tabla 4.1 – *Tamaño del problema correspondiente al caso base.*

Número de ecuaciones	10.367
Número de variables continuas	12.724
Número de variables binarias	549

Tabla 4.2 – *Variación en el tamaño del problema ante cambios en las capacidades.*

	$\pm AC$	$\pm FC$	$\pm PL$	$\pm Tr$
Número de ecuaciones	1.446	620	699	0
Número de variables continuas	1.471	1298	636	0
Número de variables binarias	47	98	106	0

parte, en la Tabla 4.2 se reporta la variación en el número de ecuaciones, variables continuas y binarias ante un cambio en la capacidad considerada. Allí $\pm AC$ se refiere a un cambio de ± 1 en la cantidad de cámaras de AC, $\pm FC$ a una variación en la cantidad de cámaras de FC, $\pm PL$ al cambio en la cantidad de líneas de clasificación, y $\pm Tr$ al cambio en la capacidad de transporte disponible. En el último caso las dimensiones del modelo no cambian dado que lo que se está cambiando es la magnitud del parámetro asociado a la capacidad de transporte (Ecuación D.60).

En lo que respecta a los tiempos de cómputo, se puede mencionar que para el caso base se requieren 30 minutos 59 segundos para resolver el PASO 1 (Problema 4.1), mientras que el PASO 2 se resuelve en 5 minutos 42 segundos (Problema 4.2).

4.4. Resultados y discusión

4.4.1. Variación de la cantidad de cámaras de frío convencional y atmósfera controlada

En la Tabla 4.3 se muestra el porcentaje de incumplimiento obtenido para cada una de las estructuras de frío consideradas. Por su parte, en la Tabla 4.4 se presentan los valores de rentabilidad obtenidos para el nivel de incumplimiento mínimo correspondiente.

De la Tabla 4.3 se puede observar cómo la capacidad de respuesta al escenario de demanda considerado es afectada por la cantidad de cámaras de conservación. Por un lado para un dado número de cámaras de AC, el aumento de FC disminuye en

Tabla 4.3 – Nivel de incumplimiento de la demanda (%).

FC	AC					
	1	2	3	4	5	6
1	33.9	28.6	24.6	22.8	18.6	16.0
2	25.4	20.0	15.2	12.4	9.3	6.8
3	25.4	20.0	15.1	10.9	8.3	5.8
4	25.4	20.0	15.1	10.9	8.3	5.8
5	25.4	20.0	15.1	10.9	8.3	5.8

Tabla 4.4 – Beneficios obtenidos (Millones de US\$).

FC	AC					
	1	2	3	4	5	6
1	3.4	2.7	1.6	2.6	1.3	1.2
2	3.9	3.1	1.5	2.3	1.1	0.9
3	4.6	3.9	3.0	2.2	1.8	1.9
4	5.0	4.4	3.6	2.9	2.7	2.5
5	5.4	4.7	4.0	3.4	3.1	3.1

forma significativa el nivel de incumplimiento al pasar de 1 a 2 cámaras. En algunos casos, se logra una disminución adicional con 3 cámaras. Más allá de este valor, no se observa que un aumento de la disponibilidad de frío convencional permita cumplir con una mayor proporción de la demanda. Por otro, puede observarse que la variación de incumplimiento de la demanda con AC, verifica una disminución sostenida en todos los casos.

Este comportamiento se explica en el hecho de que en las cámaras de FC la fruta no puede permanecer durante todo el horizonte de planeamiento. Más adelante mostraremos que con 2 cámaras de FC se alcanza a cumplir prácticamente en su totalidad la demanda correspondiente a la primera parte del año. Hay que destacar el hecho de que gran parte de la demanda de esta primera parte se satisface con fruta que no es almacenada en frío, sino que al salir del proceso de clasificación es directamente comercializada. El incumplimiento remanente corresponde a la segunda parte del año, donde la fruta no puede seguir almacenada en cámaras de FC.

Por el contrario, las cámaras de AC son utilizadas específicamente para almacenar la fruta por períodos largos. De esta forma, se logra abastecer la demanda correspondiente a la segunda parte del año con fruta conservada en estas cámaras. Es por

esto que se encuentra una disminución continua del incumplimiento con el aumento de este tipo de frío.

En líneas generales, los niveles de rentabilidad alcanzados por las distintas configuraciones (Tabla 4.4) aumentan con la cantidad de cámaras de FC y disminuyen con la cantidad de cámaras de AC. En algunos casos, sin embargo, al pasar de 1 a 2 cámaras de FC los beneficios obtenidos disminuyen, dado que es necesario resignar ventas con un alto margen de rentabilidad para bajar el nivel de incumplimiento de la demanda.

Para valores mayores de FC, los beneficios aumentan aunque el nivel de incumplimiento permanece prácticamente constante. Esto se debe a que al aumentar la cantidad de cámaras de FC, aumenta indirectamente la capacidad que tiene la estructura de procesar fruta dado que la misma puede ser conservada en frío antes de pasar por las líneas de empaque. En otras palabras, para una misma capacidad de procesamiento, definida por la cantidad de líneas de clasificación disponibles, es posible procesar por más tiempo ya que hay espacio para almacenar la fruta ingresante (Figura 4.6a). Cabe mencionar que el adicional de fruta procesado necesariamente es adquirido mediante la compra a terceros proveedores.

En lo que respecta a la variación de la cantidad de cámaras de AC, el hecho de poder ajustar mejor a los perfiles de demanda obliga a guardar fruta para la segunda parte del año, resignando de esta forma ventas que en la primera parte del año cuentan con un mayor margen de rentabilidad e incrementando los costos correspondientes a la conservación de la fruta en este tipo de frío. Por esta razón, el beneficio económico disminuye con el aumento de AC.

En la Figura 4.6a se muestra la variación encontrada en la cantidad total de fruta procesada para los diferentes escenarios de capacidad de frío considerados.

Por su parte, en la Figura 4.6b se muestra cómo se modifican las variedades procesadas con el aumento de FC, mientras que en la Figura 4.6c se presentan los cambios encontrados con el aumento de AC. Para estas dos últimas figuras se tomó como referencia la cantidad de cámaras correspondiente al caso base mencionado anteriormente: 3 cámaras de AC (Figura 4.6b), y 2 cámaras de FC (Figura 4.6c).

De la Figura 4.6a, se desprende que la cantidad total de fruta procesada no cambia con AC, mientras que aumenta con FC respondiendo a lo explicado anteriormente. En todos los escenarios se encontró que la solución propone trabajar a máxima capacidad de procesamiento durante el período de recolección de las variedades de

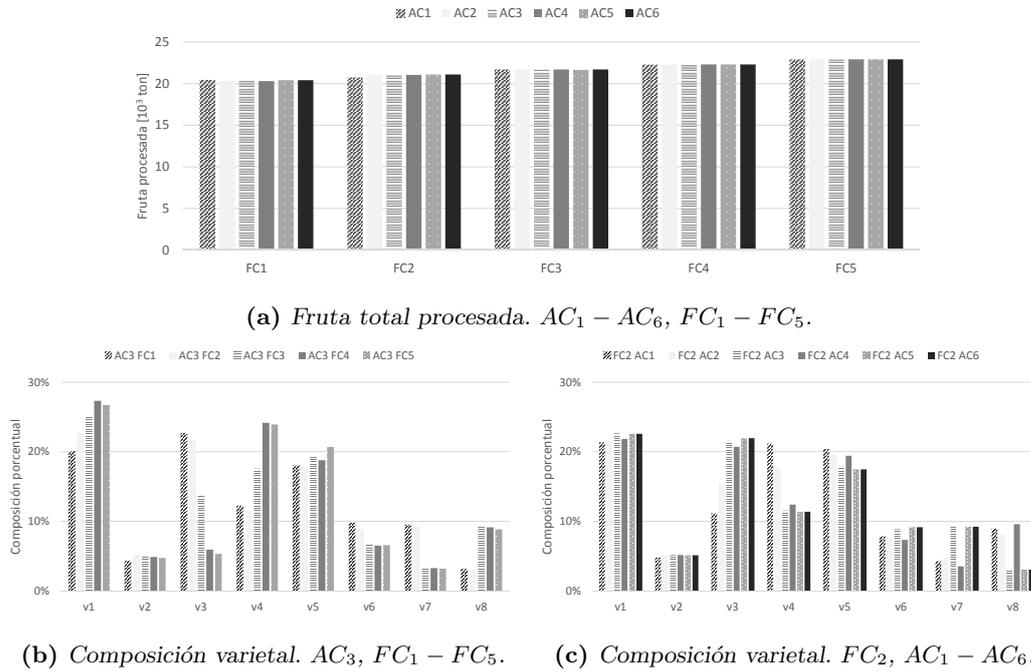


Figura 4.6 – Variación del volumen total de fruta procesada y la distribución varietal para los diferentes escenarios de capacidad de frío considerados.

fruta (cosecha).

Las variedades procesadas en los diferentes escenarios cambian según varíe FC o AC. Con el incremento de cámaras de FC, aumenta la participación de variedades que logran un mayor margen de rentabilidad en la primera parte del año. De esta forma los volúmenes procesados de v_1 , v_4 , v_5 y v_8 aumentan, en detrimento de los de v_3 , v_6 y v_7 . En v_2 no hay una variación significativa. v_4 y v_8 son las variedades de manzana y pera, respectivamente, que tienen el mayor precio de venta en la UE (Figura E.1a).

Por su parte, al aumentar la cantidad de cámaras de AC, los cambios se producen para adecuar la solución a los perfiles de demanda correspondientes a la segunda parte del año. Para lograr esto, se torna necesario aumentar la participación de v_1 , v_3 y v_6 , obligando a disminuir los volúmenes de v_4 y v_5 procesados. En v_2 no se observa un cambio significativo, mientras que v_7 y v_8 se complementan entre sí. v_1 y v_3 aumentan debido a la demanda del **MI** y **Brasil** (v_1 únicamente), mercados con los que se comercializa a lo largo de todo el año. El aumento de v_6 es causado por ser la pera más demandada en la segunda parte del año en el **MI**, sobre todo debido a sus excelentes propiedades de conservación en comparación a otras variedades de la misma especie.

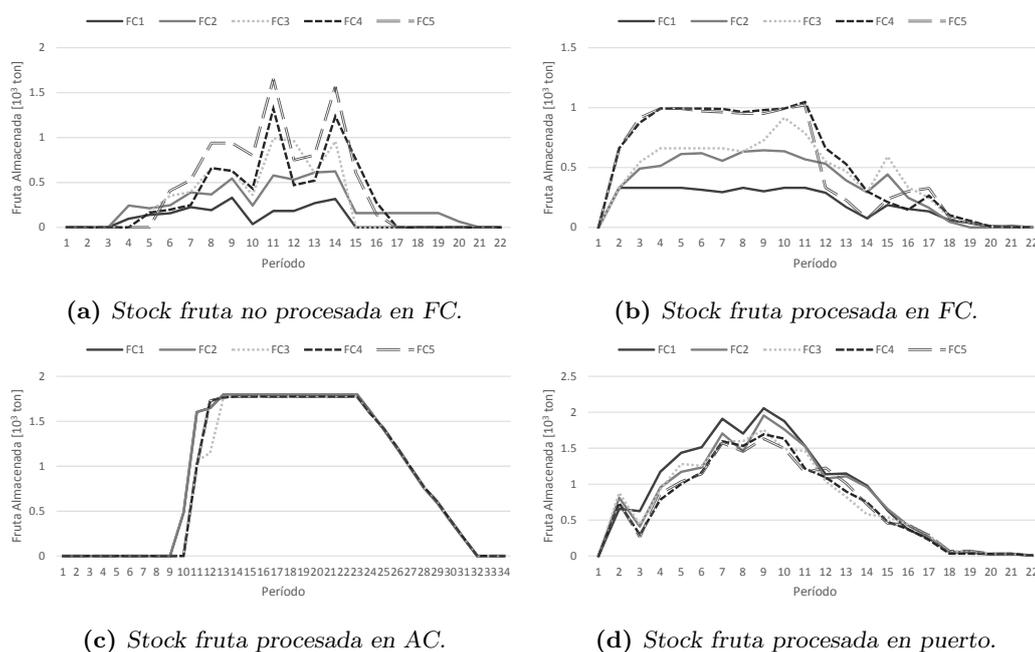


Figura 4.7 – Variación de los perfiles de stock de los distintos tipos de frío considerados con la cantidad de cámaras de FC. AC₃.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se muestran los perfiles de almacenamiento de fruta en las distintas opciones de frío consideradas con la variación de la cantidad de cámaras de FC y AC. Nuevamente, las variaciones son mostradas para el caso de 3 cámaras de AC y 2 cámaras de FC, respectivamente.

En concordancia con lo explicado anteriormente respecto al aumento de fruta total procesada con FC, el stock de fruta no procesada aumenta con la cantidad de este tipo de frío (Figura 4.7a). Los perfiles muestran que al comienzo de la temporada (períodos 1, 2 y 3), donde v_5 y v_2 son las únicas variedades recolectadas (Tabla E.1), las cámaras no son utilizadas para almacenar fruta no procesada. Con la entrada en producción del resto de las variedades, es necesario almacenar la fruta que llega de las chacras debido a que no es posible procesar todas las variedades al mismo tiempo en las líneas de clasificación disponibles. Por otro lado, los perfiles presentan una serie de picos que se acentúan con el aumento de la cantidad de cámaras de FC. Estos aparecen durante los períodos de recolección de las variedades que resultan más rentables y se comercializarán durante la primera parte del año. Están relacionados a las variedades v_8 , v_1 y v_4 , respectivamente.

El stock de fruta procesada en FC (Figura 4.7b) presenta cualitativamente perfiles similares para todos los escenarios analizados. Parte desde un alto nivel al comienzo

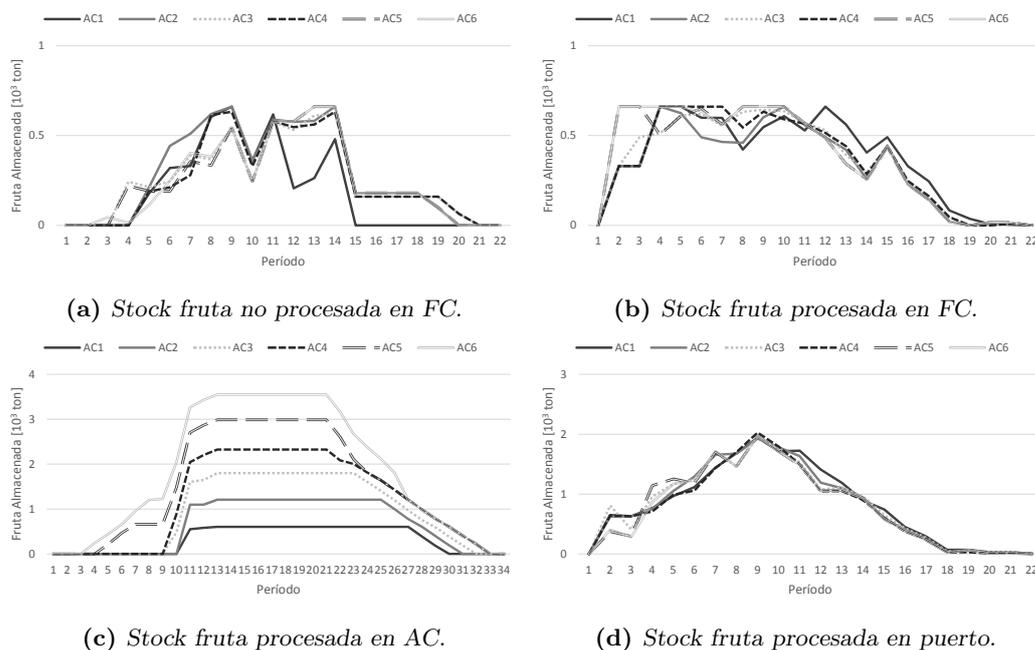


Figura 4.8 – Variación de los perfiles de stock de los distintos tipos de frío considerados con la cantidad de cámaras de AC. FC_2 .

de la temporada, el cual se mantiene hasta prácticamente finalizar la misma. Una vez pasado el período 12, los niveles de fruta procesada almacenada bajan hasta el período de recolección de v_4 donde aparece un pico. A partir del período 16, se activa la restricción de máxima permanencia en frío de las variedades que comenzaron a recolectarse más temprano en la temporada (v_2 y v_5), por lo que deben abandonar las cámaras de FC. Cuantitativamente, se observan diferencias en los niveles alcanzados en cada uno de los escenarios, lo que está relacionado directamente al aumento de capacidad de almacenamiento producido con el aumento de la cantidad de cámaras.

Es importante notar que el stock de fruta no procesada aumenta en mayor proporción que el correspondiente a la fruta procesada. Éste es un indicador de la aparición de un cuello de botella en la capacidad de procesamiento de las líneas de clasificación. Es necesario almacenar la fruta esperando a que pueda ser clasificada posteriormente.

Almacenar fruta sin procesar tiene la desventaja de que uno está enfriando un volumen de fruta que posteriormente será destinada a industria (elaboración de jugos) y por lo tanto no generará los ingresos que produce la comercialización de fruta fresca.

Los perfiles obtenidos para el stock de fruta en las cámaras de AC no se ven influenciados significativamente por el aumento de las cámaras de FC (Figura 4.7c). Las cámaras se llenan y cierran de forma similar, y se abren y vacían de forma idéntica

de forma de abastecer a los mercados en el segundo semestre.

En cuanto a la utilización del frío del puerto, se observa una disminución de los niveles de stock con el aumento de la cantidad de cámaras de FC (Figura 4.7d). Si bien la disminución no es pronunciada, hay que destacar que junto con esta tendencia se observa un incremento de los volúmenes de fruta comercializados a ultramar (se mostrará más adelante en la Figura 4.9a). Esto indica que una mayor cantidad de fruta permanece en las cámaras del galpón de empaque esperando el arribo del barco para evitar la utilización del recurso de frío del puerto de mayor costo.

Por su parte, los diferentes perfiles de frío convencional –fruta no procesada, fruta procesada y fruta en el puerto- no presentan variaciones significativas en los diferentes escenarios de atmósfera controlada considerados (Figuras 4.8a, 4.8b y 4.8d, respectivamente). Con la capacidad de frío convencional instalada en estos escenarios es posible abastecer prácticamente en su totalidad la demanda de la primera parte del año, por lo que el aumento en la capacidad de frío en AC es utilizado únicamente para abastecer la demanda correspondiente a la segunda parte del año.

El stock de fruta en atmósfera controlada (Figura 4.8c), como era de esperarse, sí se ve afectado. Se puede ver claramente como a medida que la cantidad de cámaras de AC es mayor, no solamente los niveles alcanzados son mayores, sino que también las mismas están en funcionamiento durante una mayor porción del horizonte de planeamiento.

Las cámaras no sólo comienzan a llenarse antes, almacenando una gama mayor de variedades, sino que también se abren antes y se terminan de vaciar después permitiendo abastecer en mayor medida los mercados durante la segunda parte del año en la que el frío convencional ya no puede ser utilizado.

Veremos a continuación que los perfiles de ventas también se ven modificados con la infraestructura frigorífica, produciéndose modificaciones en los mercados preferidos a la hora de cumplir con la demanda y maximizar los beneficios.

En las Figuras 4.9a y 4.9b se muestra la variación de los volúmenes de venta comercializados por mercado y por variedad con el aumento de FC y AC, respectivamente. Por su parte, en las Figuras 4.10 y 4.11 se reportan las diferencias positivas y negativas con respecto a los perfiles de demanda proporcionados, discriminados por mercado y por especie / variedad, según corresponda. Las barras positivas indican que se coloca más fruta que la demandada en algún momento del horizonte de planeamiento, mientras que las barras negativas indican un incumplimiento de parte

de la demanda. El hecho de que en un mismo campo del gráfico haya tanto barras positivas como negativas está asociado a la no inclusión de la variable tiempo. Cabe aclarar que cuando se hable de que se coloca más fruta que la “demandada” se considera que el departamento comercial de la empresa puede establecer negocios por sobre la referencia de demanda adoptada.

Para seguir las explicaciones de los párrafos subsiguientes se recomienda consultar la Figura 4.3 así como los perfiles de precios presentados en la Figura E.1. Cabe aclarar que esta serie de gráficos contiene una cantidad de información importante, para facilitar la comprensión de los mismos solo se incluirán descripciones de tendencias generales encontradas. Asimismo, conviene tener presente que por un lado los mercados de ultramar demandan fruta únicamente en la primera parte del año, mientras que la demanda del mercado regional e interno no se ve interrumpida. Por otro, las cámaras de FC no permiten almacenar la fruta por largos períodos, y las cámaras de AC sí lo hacen.

En primer lugar, analizaremos los cambios producidos con el aumento de la capacidad de FC, recordando que el nivel de incumplimiento de la demanda no se ve afectado por el aumento de este tipo de frío cuando la cantidad de cámaras de FC es mayor a 2 (Tabla 4.3). Se puede destacar que con 2 cámaras de FC es posible satisfacer la totalidad de los perfiles provistos para el mercado de ultramar (Figura 4.10). De ellos, solamente en la **UE** se coloca más fruta que la demandada, debido principalmente a la venta de la variedad v_4 que tiene un elevado precio de comercialización en ese mercado (Figura E.1a). Por su parte, una porción considerable de la demanda de **Brasil** no puede ser satisfecha con el aumento de la capacidad de frío considerado. No obstante, la cantidad de peras colocada en este mercado fuera de término, principalmente en el caso de las variedades v_5 , aumenta con la cantidad de cámaras de FC. Finalmente, los perfiles de venta colocados en el **MI** responden a dos factores. Por un lado, este mercado debe necesariamente absorber gran parte de la fruta de segunda calidad y toda la de tercera (Figura 4.3). En consecuencia, se observa que parte de los perfiles, sobre todo en lo que respecta a diferencias positivas con respecto a la demanda (Figura 4.10), siguen lo que se comercializa en ultramar. Por otro, de las variedades más demandadas, v_1, v_3, v_5 y v_6 (Tabla E.15), solamente v_5 no se comercializa en la segunda parte del año, por lo que hay un remanente de incumplimiento en las restantes por la incapacidad de almacenar fruta para esta porción del horizonte de planeamiento.

Si ahora observamos los cambios que se producen al modificar la cantidad de cáma-

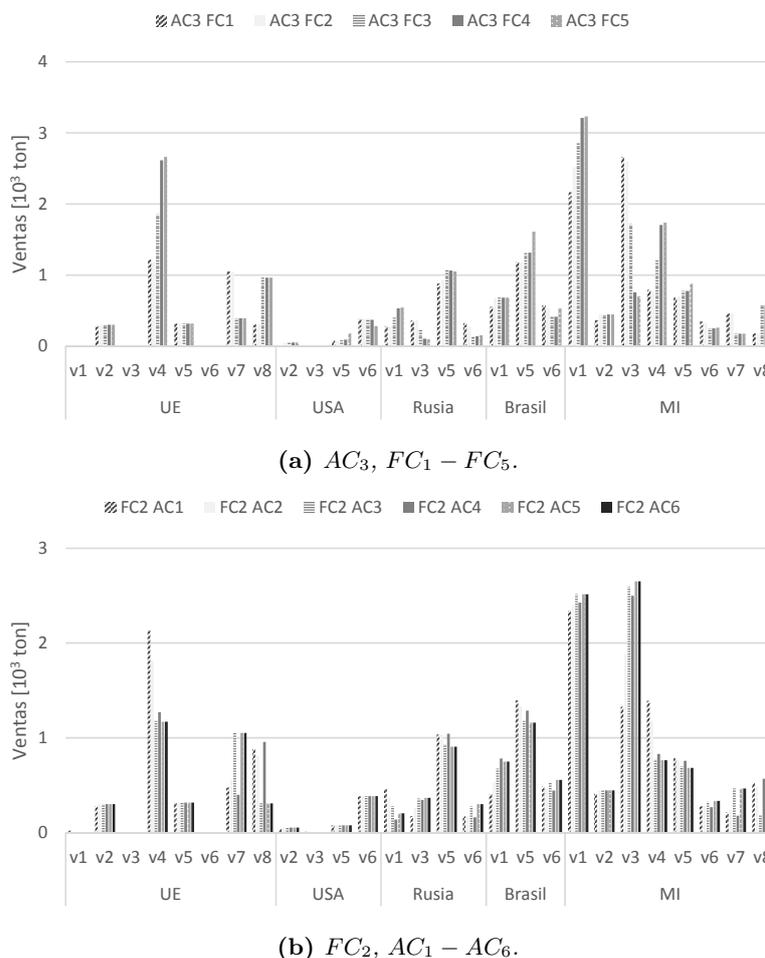


Figura 4.9 – Variación de los volúmenes de venta por mercado y por variedad para AC_3 y FC_2 .

ras de AC (Figuras 4.9b y 4.11), las tendencias en muchos casos son opuestas a las encontradas para el aumento de la capacidad de FC. La razón principal es que dado que el aumento de este tipo de cámaras permite un mejor ajuste a la demanda (Tabla 4.3), se debe resignar la asignación de almacenamiento a las variedades más rentables para dedicarlo a aquellas variedades y mercados que permiten adecuarse mejor a los perfiles. Se puede mencionar que en el caso de los mercados de ultramar, la totalidad de la demanda es satisfecha desde el primer escenario considerado debido a que se cuenta con la capacidad de FC mínima para lograrlo (2 cámaras). Las principales diferencias se encuentran en la disminución progresiva de las diferencias negativas con respecto a la demanda de **Brasil** y **MI** que, como dijimos anteriormente, son los mercados en los que se coloca fruta durante todo el año. En **Brasil** por un lado el mayor volumen comercializado de v_1 (Figura 4.9b) permite mejorar el ajuste del perfil de manzana, pero en ningún caso se realizan envíos fuera de término

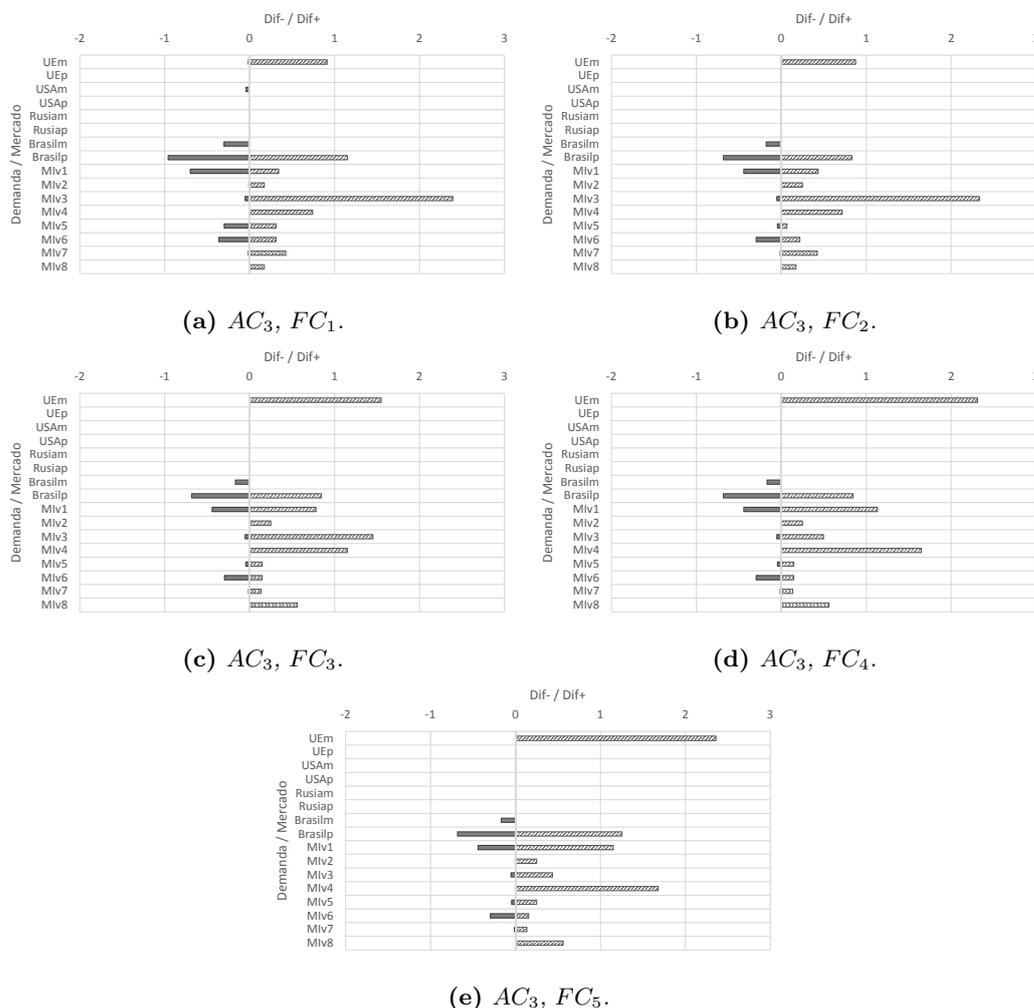


Figura 4.10 – Diferencias positivas y negativas discriminadas por mercado con respecto a los perfiles de demanda proporcionados para $AC_3, FC_1 - FC_5$.

(Figura 4.11). En el caso de las peras, las ventas de v_5 son reemplazadas parcialmente por v_6 (Figura 4.9b) lo que produce la disminución tanto de las diferencias positivas como de las negativas (Figura 4.11). Este comportamiento se repite en el **MI** tanto para v_1 como para v_6 , las dos variedades más demandadas en la segunda parte del año (Tabla E.15).

En las Figuras 4.12 y 4.13 se presenta la evolución de los perfiles de venta en el tiempo con el agregado de cámaras de FC y AC, respectivamente. La línea gris del gráfico representa el volumen de fruta demandado por todos los mercados en un dado período. El área a rayas indica que se ha enviado más fruta de la demandada a alguno de los mercados, mientras que el área gris sólida indica que se envió menos de lo demandado. Puede darse el caso en el que para un mismo período se encuentre

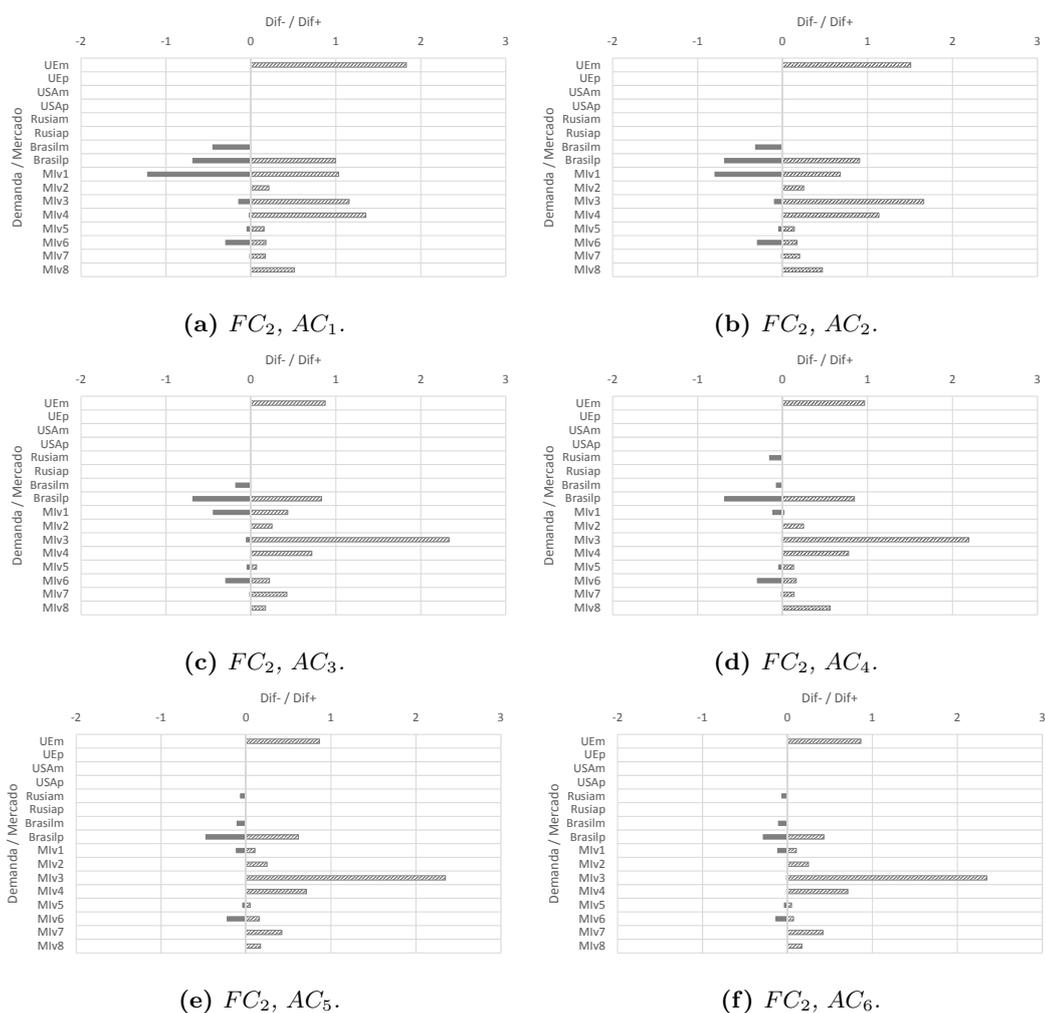


Figura 4.11 – Diferencias positivas y negativas discriminadas por mercado con respecto a los perfiles de demanda proporcionados para $FC_2, AC_1 - AC_6$.

que haya tanto diferencias positivas como negativas. Esto sucede cuando se vende más que lo demandado a algún mercado, mientras que no se alcanza a cumplir con la demanda de otro.

Esta serie de gráficos permite observar claramente como el cambio en la cantidad de cámaras de FC tiene influencia sobre el cumplimiento de la demanda en la primera parte del año, mientras que las cámaras de AC logran un efecto positivo en la segunda parte del año.

El área gris debajo de la curva de demanda en la Figura 4.12a desaparece en la Figura 4.12b haciendo prácticamente nulas las diferencias negativas correspondientes a la primera parte del año. Sin embargo, más allá del período 20 no presenta cambios con el aumento de la cantidad de cámaras de FC.

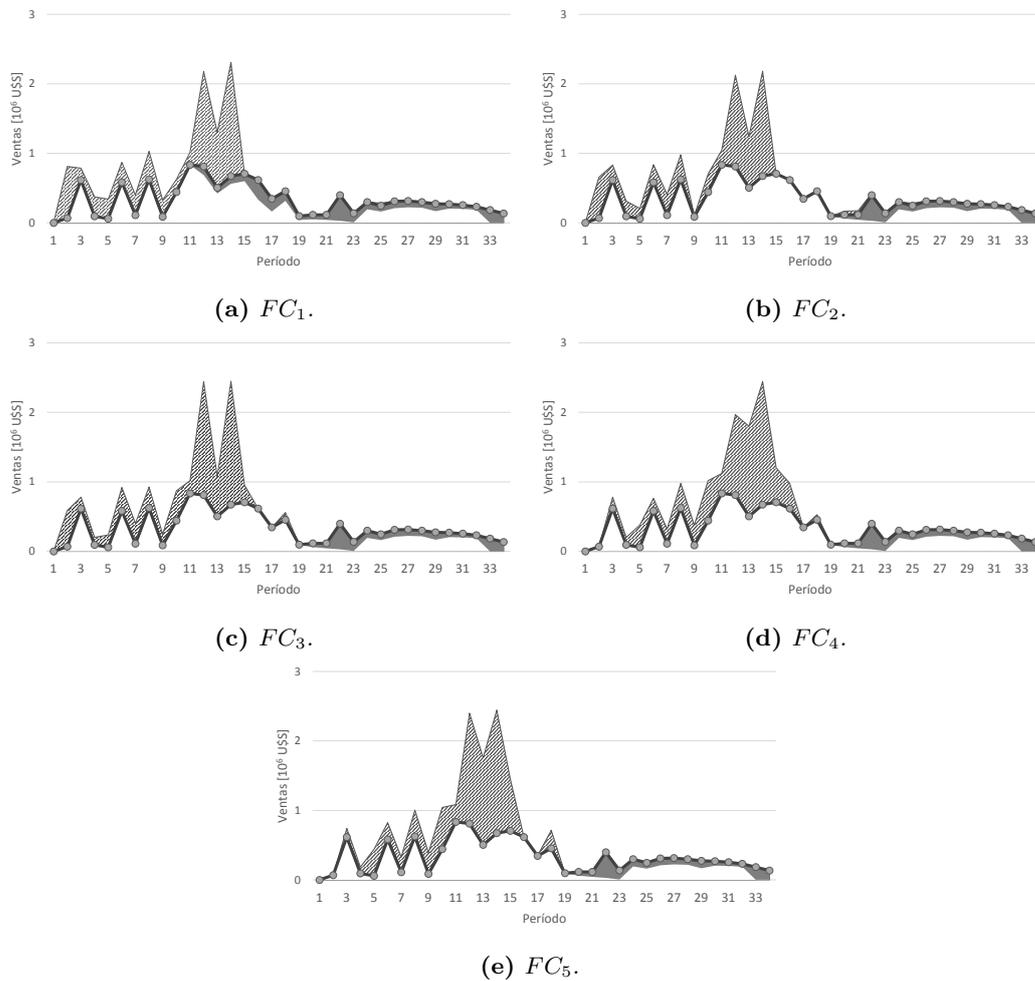


Figura 4.12 – Desviaciones temporales de las ventas con respecto a la demanda. AC_3 , $FC_1 - FC_5$.

En cuanto a las diferencias positivas se ve un claro aumento de la magnitud de las mismas en la primera parte del año, indicando el aumento de volumen comercializado en esta porción del horizonte de planeamiento cuando resulta rentable. Los picos de mayor intensidad se encuentran sobre el final de la temporada, entre los períodos 11 y 14, períodos asociados a la recolección de las variedades más comercializadas (Tabla E.1 y Figura 4.9a).

Por su parte, la serie de gráficos de la Figura 4.13 muestra cómo con el aumento de cámaras de AC, la porción de área gris que disminuye es la correspondiente a la segunda parte del año. A su vez, la magnitud del área rayada correspondiente a las diferencias positivas de la primera parte del año también disminuye, y a partir de 5 cámaras (Figura 4.13e) aparecen diferencias positivas en la segunda parte del año. Esto último evidencia una clara redistribución de la comercialización no solamente en lo que respecta a mercados, sino también en el tiempo, recordando de la Figura 4.6a

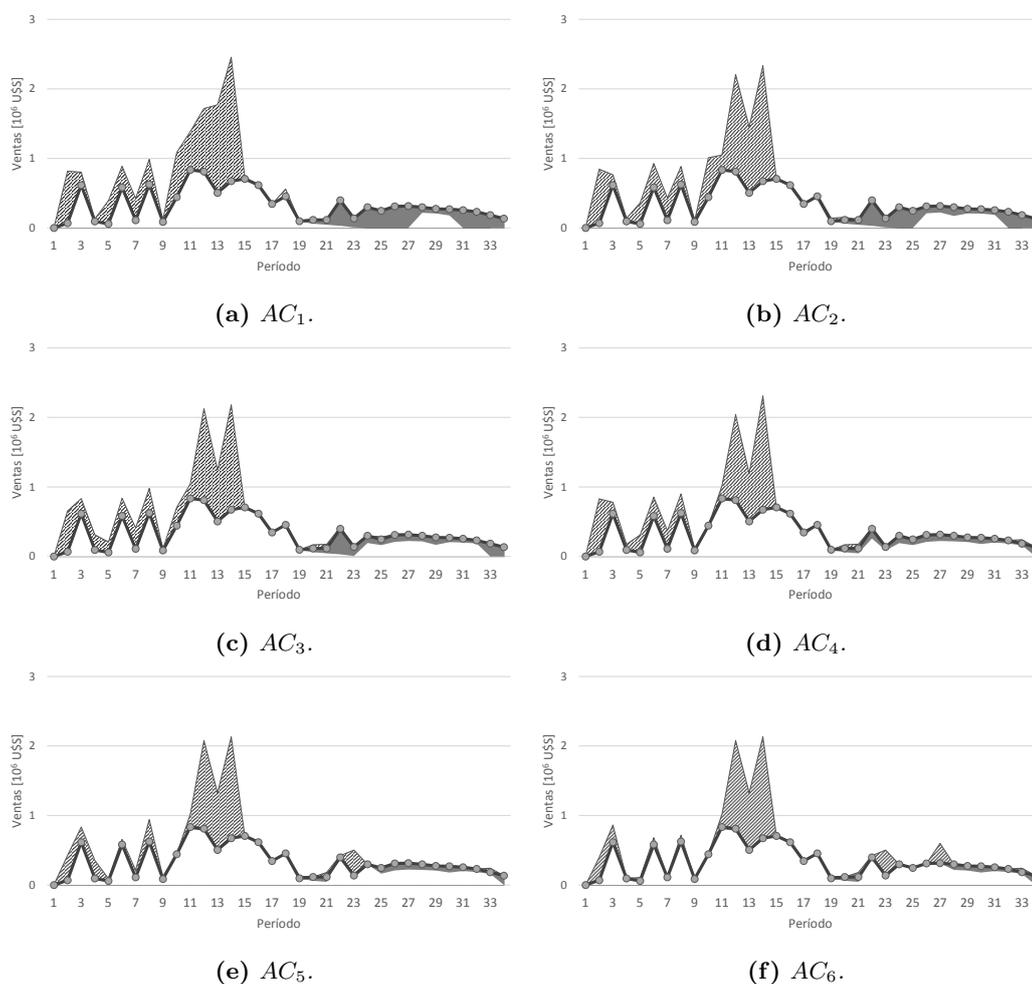


Figura 4.13 – Desviaciones temporales de las ventas con respecto a la demanda. FC_2 , $AC_1 - AC_6$.

que la cantidad total de fruta procesada no cambia con la cantidad de cámaras de AC.

4.4.2. Variación de la cantidad de líneas de clasificación y empaque

En la Figura 4.14 se muestran algunos resultados generales obtenidos para los cuatro escenarios de líneas de clasificación y empaque considerados ($PL_1 - PL_4$). La Figura 4.14a muestra los beneficios económicos (BEN) junto con el nivel de incumplimiento de la demanda alcanzado (DIF^-). En las Figuras 4.14b y 4.14c se presentan el volumen total de fruta procesada y la distribución varietal, respectivamente. Finalmente, en la Figura 4.14d se muestra la distribución porcentual de la utilización de las distintas opciones de frío consideradas.

El nivel de incumplimiento de la demanda, solamente es afectado por la cantidad

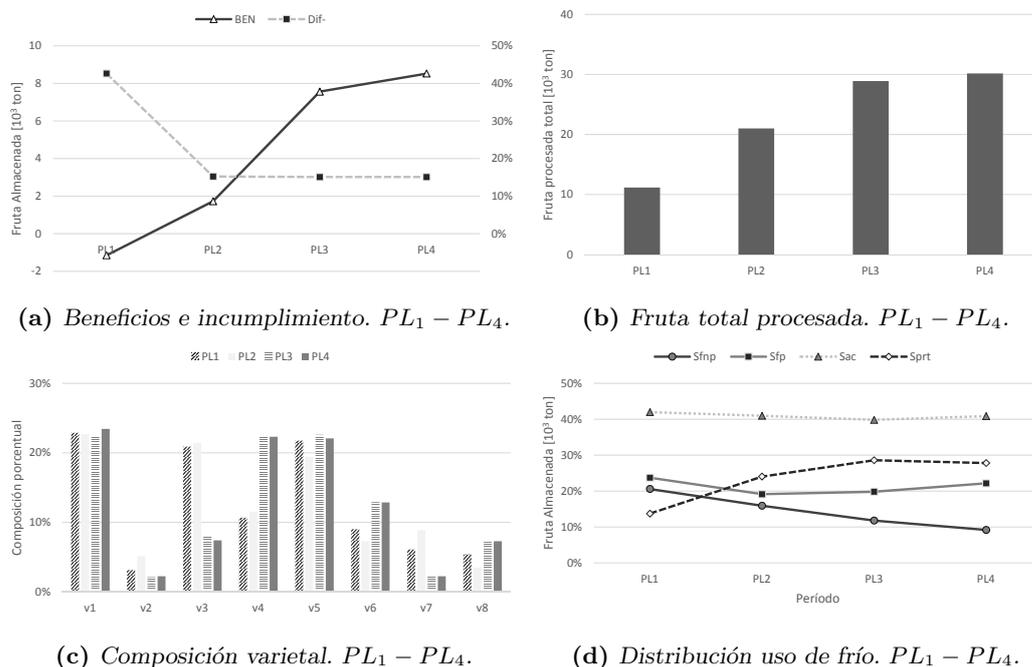


Figura 4.14 – Resultados obtenidos con la variación de capacidad de procesamiento: beneficios y nivel de incumplimiento; fruta total procesada; composición varietal; distribución del uso de frío (Sfnp: fruta no procesada en FC, Sfp: fruta procesada en FC, Sac: frío en AC, Sprt: frío en puerto).

de líneas de clasificación al pasar de 1 a 2 líneas (Figura 4.14a). Más allá de este valor, no se observa una mejora en el valor de dicha variable. Sin embargo, los beneficios económicos aumentan en todos los casos con el incremento de la capacidad de procesamiento. Es necesario destacar que en el caso en el que se cuenta con una única línea de clasificación, no se alcanza a obtener una rentabilidad positiva.

Por otro lado, la cantidad de fruta procesada aumenta con la cantidad de líneas de clasificación, como era de esperarse (Figura 4.14b). Este incremento proviene de una mayor utilización de fruta de terceros. Se observa también que el incremento de fruta total procesada producido al pasar de 3 a 4 líneas de clasificación es sustancialmente menor a los anteriores incrementos indicando la presencia de un cuello de botella en algún sector del sistema que impide procesar una mayor cantidad de fruta. En este caso, el cuello de botella se genera en la cantidad de fruta fresca que se puede recibir por día, el cual está limitado por una cota máxima que no es función de la cantidad de líneas de clasificación, sino que está relacionado a otros recursos aguas arriba del proceso (Ecuación D.10).

En lo que respecta a la distribución varietal (Figura 4.14c), v_1 , v_2 y v_5 no presentan variaciones significativas. v_3 es remplazada por v_4 , mientras que v_6 , v_7 y v_8 se

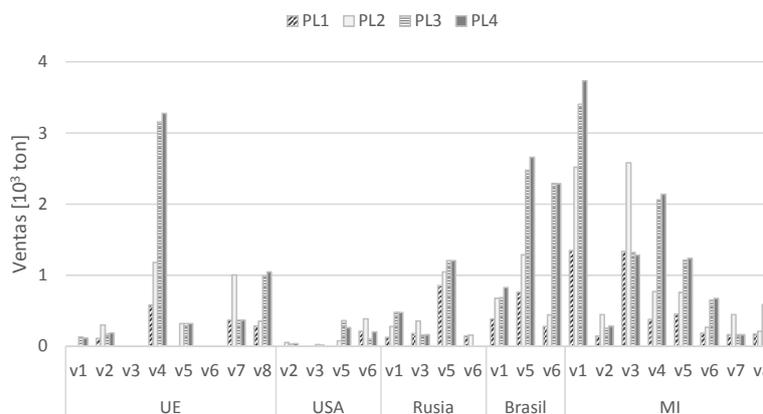


Figura 4.15 – Variación de los volúmenes de venta por variedad y por mercado con la cantidad de líneas de clasificación ($PL_1 - PL_4$).

complementan entre sí. De estas últimas se ven favorecidas v_6 y v_8 por encima de v_7 cuando se alcanzan las 3 líneas de clasificación. Cabe destacar que así como no se encontraron diferencias significativas en cuanto al volumen total procesado entre 3 y 4 líneas, tampoco las hay en la distribución de las variedades a procesar seleccionadas.

En cuanto a la variación de la utilización de los distintos tipos de frío (Figura 4.14d), se observa en primer lugar la disminución en la participación del stock de fruta no procesada en FC. Contar con una mayor capacidad de procesamiento permite procesar más rápidamente la fruta que ingresa al galpón de empaque y disminuir así el almacenamiento de fruta sin procesar. De esta forma, como se mencionó anteriormente, se evita enfriar fruta que posteriormente pasará a formar parte del descarte. Puede observarse que la participación de AC y FC se mantienen prácticamente invariantes, mientras que se produce un incremento significativo de la fruta almacenada en puerto, lo que nos permite inferir que el volumen de fruta comercializado en ultramar también aumenta, hecho que quedará demostrado a continuación.

La Figura 4.15 muestra los volúmenes de venta discriminados por variedad y por mercado para los escenarios analizados. Adicionalmente, en la Figura 4.16 se presentan tanto las diferencias positivas como negativas a los perfiles de demanda proporcionados.

En este caso se encontró una tendencia general bastante definida: el aumento de la capacidad de procesamiento produce un aumento en las ventas de todas las variedades a todos los mercados (Figura 4.15). Esto último se traduce en una disminución de las diferencias negativas a los perfiles al pasar de 1 a 2 líneas de clasificación (Figura 4.16), y en un aumento de las diferencias positivas, sobre todo en lo que

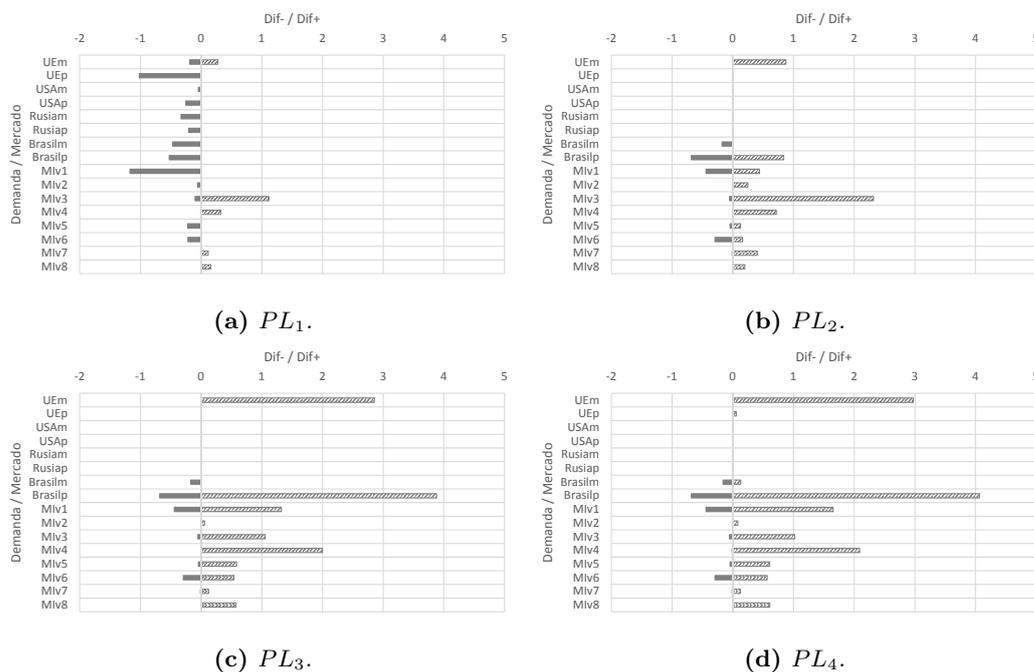


Figura 4.16 – Diferencias positivas y negativas con respecto a los perfiles de demanda proporcionados ($PL_1 - PL_4$).

respecta a las manzanas en la **UE** y peras en **Brasil**, seguidas de v_1 y v_3 en **MI** para todos los escenarios.

La Figura 4.17 muestra las variaciones temporales que se producen en el ajuste al perfil de demanda con el cambio en la capacidad de procesamiento de los distintos escenarios.

La magnitud de las diferencias negativas (áreas grises) muestra cómo efectivamente más allá de dos líneas de clasificación no se producen mejoras en el cumplimiento de la demanda. Al comparar dichas áreas entre los dos primeros escenarios, se observa que con una única línea de clasificación no es posible cumplir con buena parte de la demanda correspondiente a la primera parte del año. También aparecen diferencias en la segunda parte, debido a que si bien hay capacidad de almacenamiento de AC para abastecer parte del mercado en esta época del año, no es posible procesar esta fruta a tiempo quedando capacidad ociosa de este tipo de frío en el primer escenario.

En lo que respecta a las diferencias positivas (áreas rayadas), como ya se mencionó, se observa un aumento de las mismas con la capacidad de procesamiento. Es necesario destacar que el incremento solamente se da en la primera parte del año, principalmente en los períodos relacionados a la recolección de las variedades v_1 y v_4 .

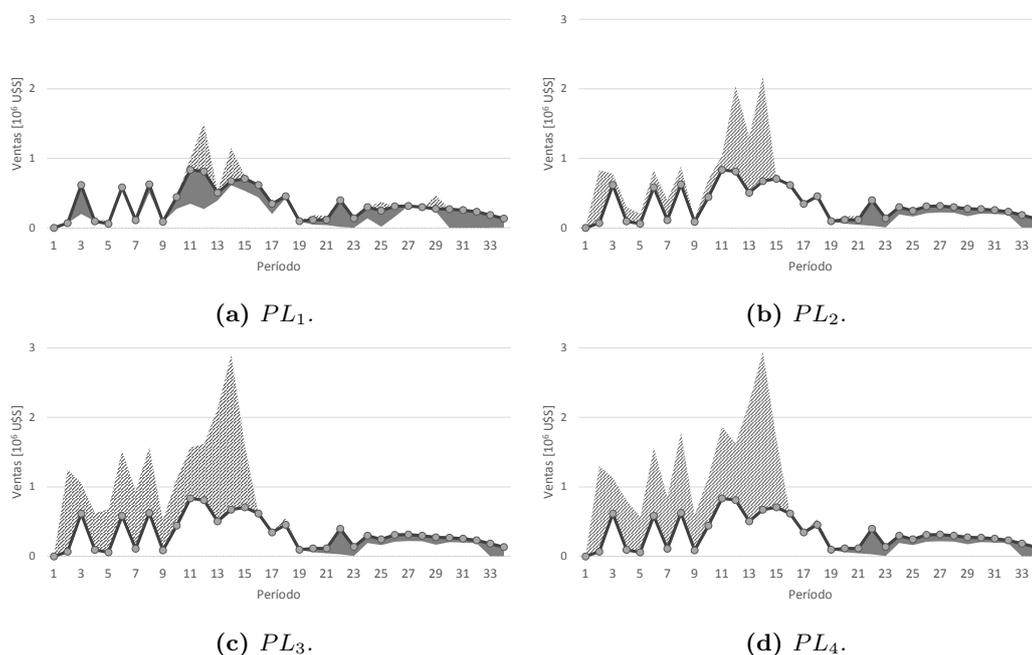


Figura 4.17 – Desviaciones temporales de las ventas con respecto a la demanda. $PL_1 - PL_4$.

4.4.3. Variación de la disponibilidad de transporte

En este último caso de estudio, se ha modificado la disponibilidad de camiones a la hora de enviar la fruta empacada al mercado de destino, o al puerto en el caso de que la comercialización sea a ultramar. Es necesario recordar que la infraestructura de la cadena en los distintos escenarios es única, dado que la disponibilidad de transporte se aproxima como una capacidad continua y no se la modela con la utilización de variables discretas. La Figura 4.18 muestra los resultados correspondientes al análisis de los distintos escenarios de disponibilidad de transporte considerados. En la Figura 4.18a se reportan los beneficios económicos obtenidos junto con el nivel de incumplimiento mínimo alcanzado. Por su parte, la Figura 4.18b muestra la variación de la distribución porcentual de las variedades procesadas. A continuación, en la Figura 4.18c se presenta el total de fruta procesada, junto con el nivel de ocupación temporal de las líneas de clasificación en la Figura 4.18d para cada uno de los escenarios. Cabe señalar que la capacidad máxima de procesamiento, calculada como el producto entre la cantidad de líneas disponibles, la capacidad máxima por turno por línea, la cantidad máxima de turnos diarios y la longitud del período, cambia para cada uno de los períodos dado que la longitud de los mismos no es uniforme.

En cuanto a la variación del nivel de incumplimiento de la demanda (Figura 4.18a), se observa cómo disminuye en forma sostenida para los primeros escenarios a medida

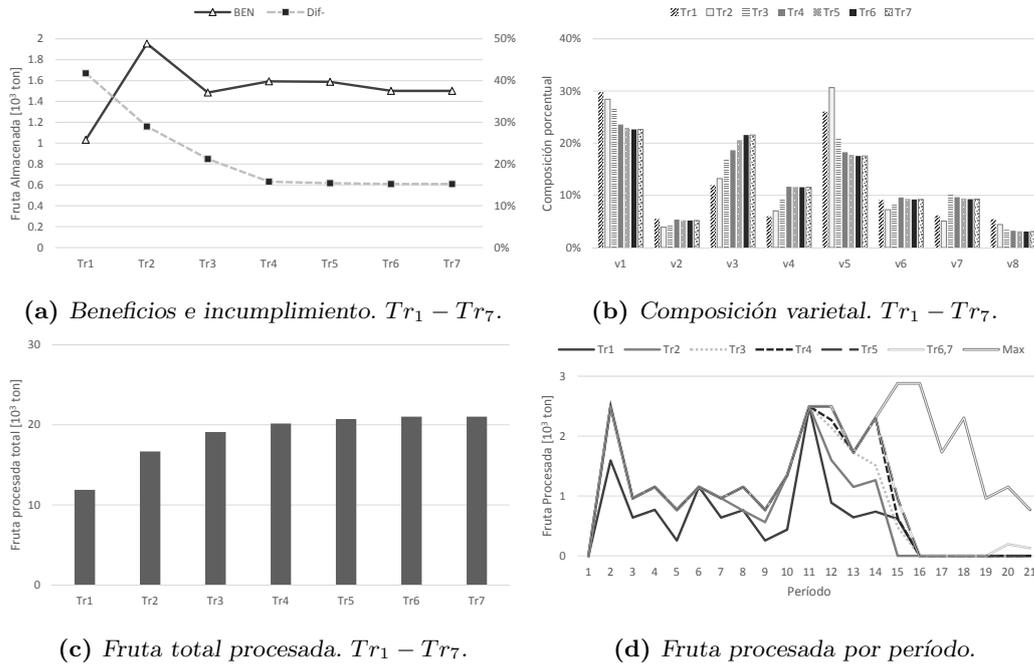


Figura 4.18 – Resultados obtenidos con la variación de la capacidad de transporte: beneficios y nivel de incumplimiento; composición varietal; fruta total procesada; fruta procesada por período.

que aumenta la disponibilidad de transporte. Cuando dicha disponibilidad supera los 4 camiones diarios, la variación de un escenario a otro es menor al 1%, por lo que las diferencias no alcanzan a apreciarse en el gráfico.

La curva de beneficios (Figura 4.18a) presenta una relación de compromiso importante entre el aumento de la disponibilidad de transporte y la disminución del nivel de incumplimiento. En algunos casos el efecto positivo del aumento de la capacidad de transporte es superior al efecto negativo de la disminución del nivel de incumplimiento, por lo tanto los beneficios suben al pasar de un escenario a otro, mientras que en otros casos se da la situación inversa.

Llama la atención que la rentabilidad obtenida para 6 y 7 camiones diarios disminuye con respecto a la de 5 camiones. Esto se atribuye a que por un lado, con los primeros se logra un nivel de incumplimiento levemente inferior (no se aprecia en el gráfico). Por otro, prácticamente no hay efecto positivo producido por el incremento de la capacidad de transporte. Por lo tanto, los beneficios obtenidos son menores.

La Figura 4.18c muestra que la cantidad total de fruta procesada aumenta con la disponibilidad de transporte. El incremento producido al pasar de un escenario a otro va disminuyendo hasta que más allá de 5 camiones diarios no se observa una diferencia significativa. Por su parte, en el primero de los escenarios considerados,

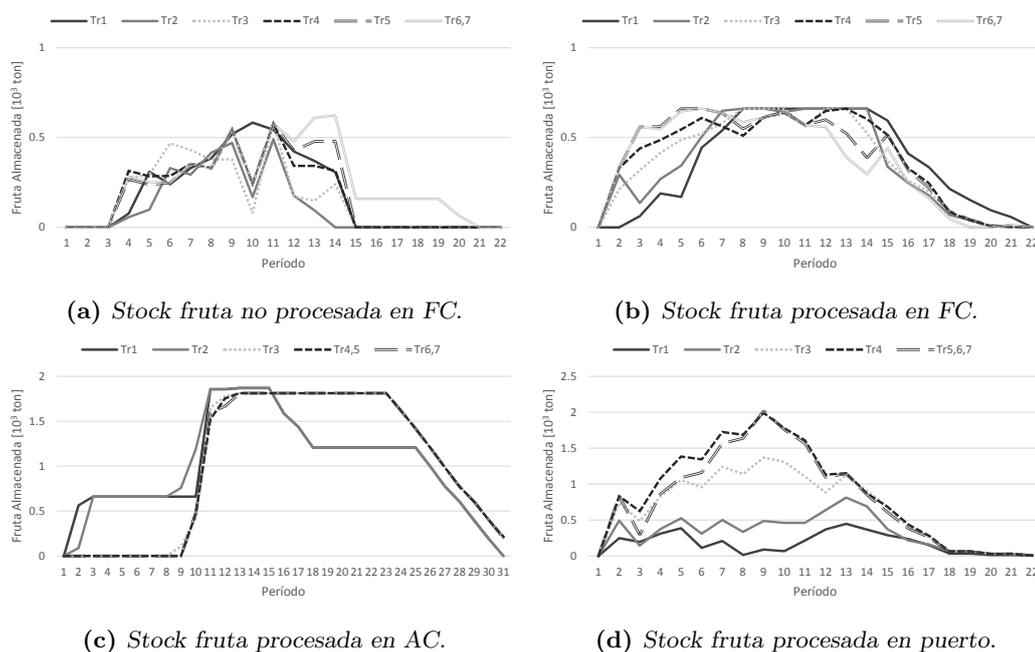


Figura 4.19 – Variación de los perfiles de los distintos tipos de frío considerados con Tr .

se encuentra que únicamente en el período 6 se trabaja a máxima capacidad. Con 2 camiones se trabaja a máxima capacidad solamente hasta el período 7, y en el 10 y el 11. Con 3 y 4 camiones se lo hace hasta el período 11 y en el 13. Finalmente, recién a partir de 5 camiones se trabaja a máxima capacidad durante toda la temporada de recolección de fruta (Figura 4.18d).

La Figura 4.19 muestra los perfiles de almacenamiento en los distintos tipos de frío. Aquellos perfiles que se repiten de un escenario a otro fueron agrupados en una misma serie del gráfico.

La utilización de los distintos recursos de almacenamiento es el resultado de la combinación entre la cantidad de fruta procesada y la capacidad que tiene la estructura para sacar la fruta del galpón de empaque y comercializarla.

El stock de fruta sin procesar (Figura 4.19a) alcanza niveles elevados para el primer escenario, disminuye en el segundo y a partir de ahí, aumenta en los escenarios subsiguientes. La disminución del primer escenario al segundo se da por el aumento de la disponibilidad de transporte que permite comercializar la fruta. Mientras que el aumento posterior, es producido por la limitación de la capacidad de procesamiento de la fruta.

El stock de fruta procesada en FC (Figura 4.19b) aumenta en la primera parte de

la temporada junto con la capacidad de transporte. Por otra parte, a baja disponibilidad de transporte el stock de este tipo de almacenamiento es mayor, dado que es necesario guardar la fruta hasta que pueda ser enviada a los mercados. Cuando la capacidad de transporte aumenta, el envío se produce antes y de esta forma los niveles de stock disminuyen.

En lo que respecta a los perfiles de atmósfera controlada (Figura 4.19c), se observa nuevamente la tendencia de que a baja disponibilidad de transporte es necesario buscar la forma de guardar la fruta en el galpón de empaque y poder distribuirla en el horizonte de planeamiento. De esta forma, con 1 y 2 camiones diarios, se guarda fruta en las cámaras al comienzo de la temporada y son abiertas inmediatamente después de su finalización. De esta manera se logra distribuir la comercialización de fruta sin resignar un porcentaje mayor de ventas. Cuando hay 3 camiones diarios disponibles, ya es posible almacenar dentro de las cámaras de AC la fruta más rentable en la segunda parte del año y abrirlas en el momento que resulta conveniente comercializarla.

Finalmente, los niveles de stock de frío en el puerto (Figura 4.19d) son el resultado de dos efectos diferentes. En primer lugar, a mayor disponibilidad de transporte, mayor es el volumen comercializado a ultramar. Se espera por lo tanto, que la utilización de los recursos del puerto sea mayor, cosa que ocurre en líneas generales. Sin embargo, se encuentra que el stock en el puerto con 4 camiones es mayor que el correspondiente a los siguientes escenarios analizados, siendo el volumen comercializado a ultramar prácticamente idéntico (ver Figura 4.20). Esto se debe a que cuanto mayor es la capacidad de transporte, mayor es el volumen de fruta que puede enviarse al puerto en el preciso momento que el barco arriba sin necesidad de tener que ser enviada de forma preventiva antes de la llegada de este y almacenarse en las cámaras disponibles allí.

En la Figura 4.20 se presentan los volúmenes de venta por variedad a los distintos mercados para los diferentes escenarios considerados. Además, en la Figura 4.21 se presentan las diferencias negativas y positivas a cada uno de los perfiles de demanda proporcionados.

En lo que respecta a la comercialización ultramar, se observa que para valores mayores de 3 camiones diarios se alcanza a cumplir con toda la demanda de estos mercados (Figura 4.21d en adelante). Solamente para el caso de las manzanas a la UE se decide enviar más fruta de la demandada (Figura 4.21). En el mercado de **Brasil** se encuentra que los volúmenes comercializados de v_1 aumentan con la capacidad de

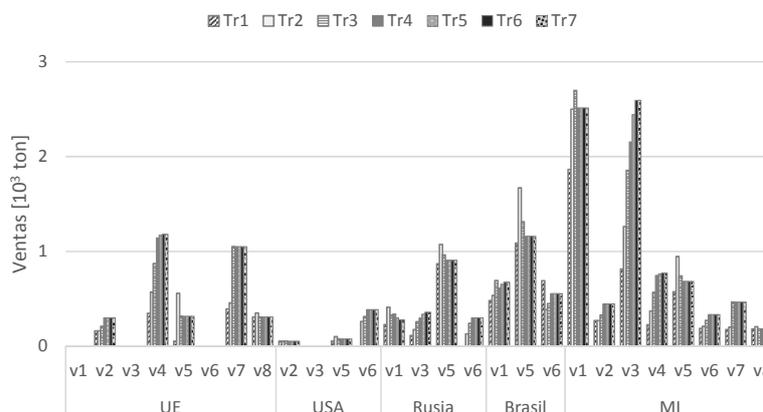
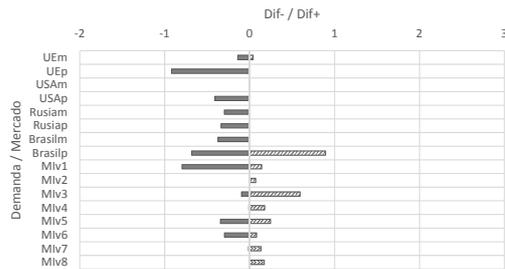


Figura 4.20 – Variación de los volúmenes de venta por mercado y por variedad con la disponibilidad de camiones ($Tr_1 - Tr_7$).

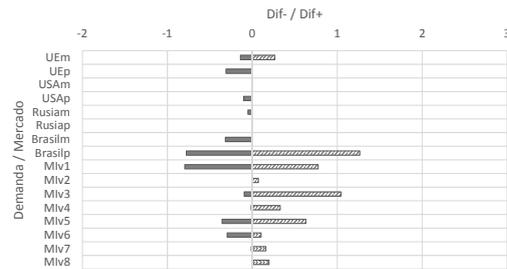
transporte, pero solamente lo hacen para disminuir las diferencias negativas con respecto a la demanda, dado que en ningún caso se envía más fruta que la demandada. Por su parte, los cambios producidos en la comercialización de peras a este mercado (Figura 4.20), disminuyen tanto las diferencias positivas como las negativas (Figura 4.21). Finalmente, en el **MI** aumentan, en líneas generales, las ventas de todas las variedades con el aumento de la capacidad de transporte. No obstante, el nivel de incumplimiento en este mercado mejora únicamente hasta alcanzar los 3 camiones diarios (Figura 4.21c), superado este valor no hay una disminución en las diferencias negativas. Las variedades que mayores volúmenes de comercialización alcanzan son v_1 y v_3 , en manzanas y v_5 y v_7 en peras. No obstante, los volúmenes comercializados en este mercado de manzana superan ampliamente a los de pera.

Finalmente, la Figura 4.22 muestra la variación temporal de los volúmenes de venta correspondiente a los diferentes escenarios analizados. En el caso de 6 y 7 camiones (Figura 4.22f), los perfiles son idénticos por lo que se reportan en un único gráfico.

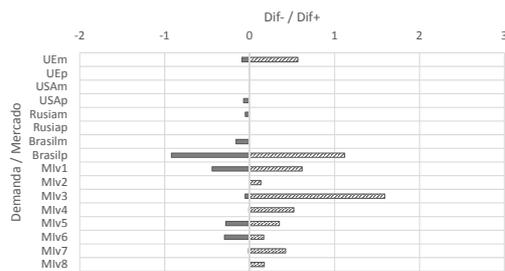
Cuando la disponibilidad de camiones es 1 (Figura 4.22a), se observa que únicamente en una pequeña porción del horizonte de planeamiento es posible cumplir con los perfiles de demanda. Con 2 camiones (Figura 4.22b) la mejora se observa sobre todo en la primera parte del año. También aumentan las áreas rayadas, indicando que se vende por encima de lo demandado a alguno de los mercados. Al pasar a 3 camiones (Figura 4.22c) hay una mejora en lo que respecta al cumplimiento de la demanda en la segunda mitad del año. Señalando que con este nivel de transporte se aprovecha mejor la capacidad de atmósfera controlada instalada (Figura 4.19c). Por otro lado, se intensifica la magnitud de las desviaciones positivas de la demanda en la primera



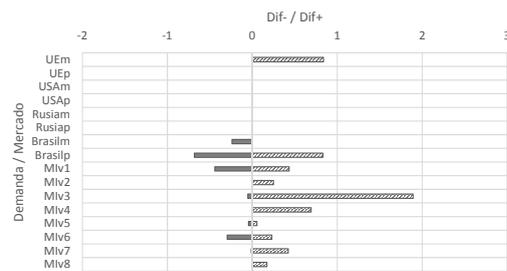
(a) Tr_1 .



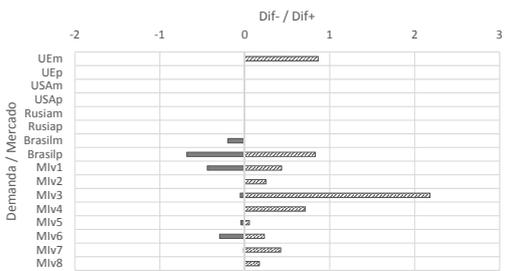
(b) Tr_2 .



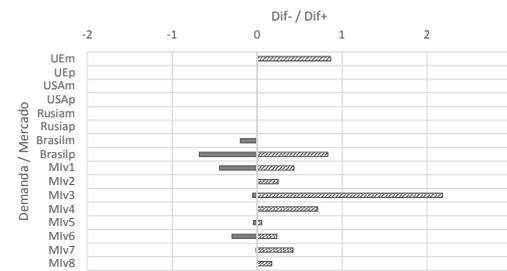
(c) Tr_3 .



(d) Tr_4 .



(e) Tr_5 .



(f) Tr_6, Tr_7 .

Figura 4.21 – Diferencias positivas y negativas con respecto a los perfiles de demanda proporcionados ($Tr_1 - Tr_7$).

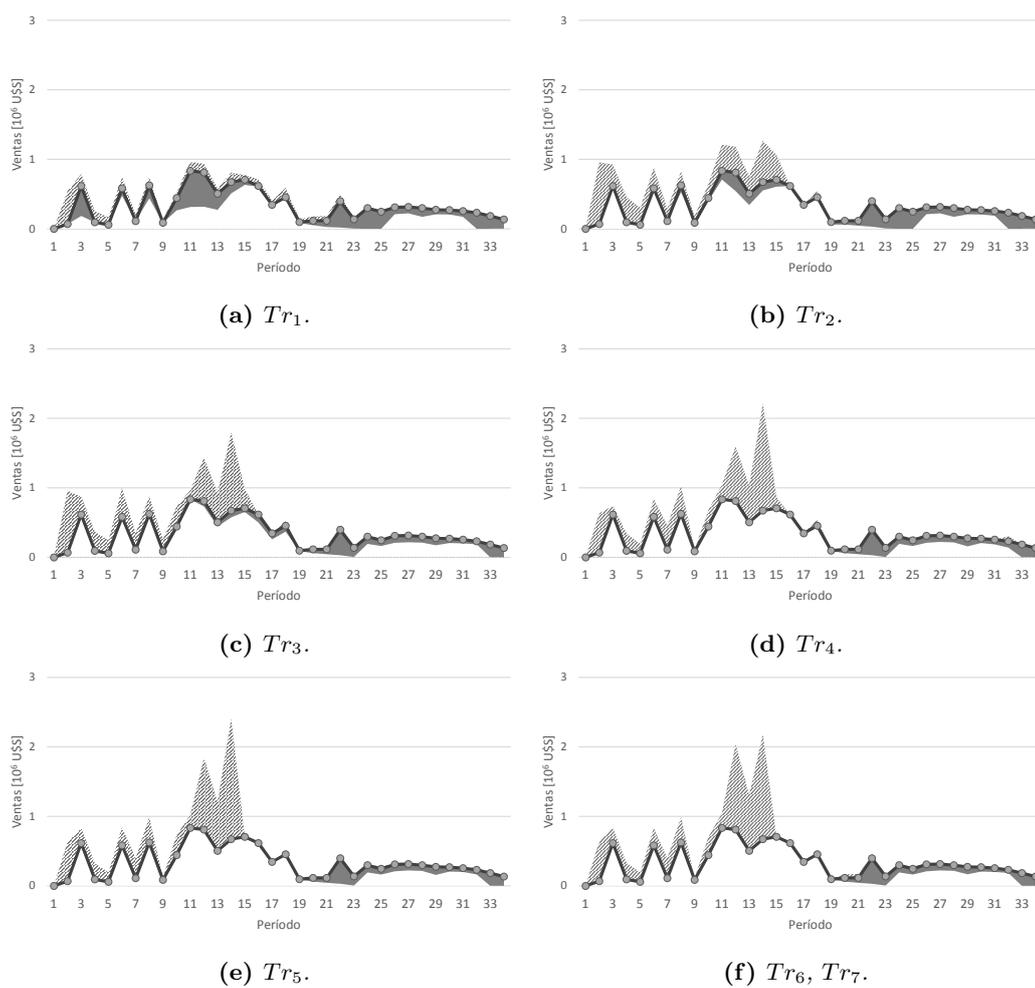


Figura 4.22 – Desviaciones temporales de las ventas con respecto a la demanda. $Tr_1 - Tr_7$.

parte del año. Finalmente, con 4 camiones (Figura 4.22d) se alcanza a cumplir con toda la demanda de la primera parte del año, mientras que la correspondiente a la segunda parte no es posible cumplirla en su totalidad debido a la capacidad de frío de atmósfera controlada con el que se cuenta para estos escenarios. Con el aumento progresivo de la capacidad de transporte se observa una intensificación de las áreas rayadas sobre todo en la primera parte del año y durante los períodos de recolección de las variedades v_1 y v_4 , tal como sucedió en casos de estudio anteriores.

4.5. Conclusiones

En este capítulo el método de optimización multi-objetivo lexicográfico fue utilizado para evaluar la influencia del cambio en la infraestructura de la cadena de suministro tanto para la satisfacción de la demanda como para el beneficio económico.

En lo que respecta a la satisfacción de la demanda, todos los estudios realizados, a excepción del correspondiente al de la cantidad de cámaras de atmósfera controlada, mostraron un escenario más allá del cual no es posible mejorar en este apartado, poniendo de relieve el carácter estacional de la actividad, ya que gran parte de los componentes de la cadena tienen influencia principalmente en una porción limitada del horizonte de planeamiento.

Por su parte, se encontró que los cambios producidos en el beneficio económico en los diferentes escenarios son resultado de dos efectos: i) influencia del aumento de capacidad de un recurso específico; ii) influencia del grado de satisfacción de la demanda.

En primer lugar, el efecto producido por el aumento de capacidad quedó evidenciado en los escenarios donde un aumento del recurso en estudio no suponía una mejora en la satisfacción de la demanda. En estos casos, se comprobó que, en líneas generales, el aumento de las diferentes capacidades producía una mejora en el aspecto económico. Las mejoras más significativas en este sentido se lograron con el aumento en la cantidad de líneas de clasificación, seguido por el aumento en la cantidad de cámaras de frío convencional, la capacidad de transporte y, por último, la cantidad de cámaras de atmósfera controlada. Se constató además que el aumento de las diferentes capacidades no presenta una relación lineal con el beneficio económico. Incluso hubo escenarios donde un aumento de la capacidad no se tradujo en una posterior mejora económica, manifestando la aparición de cuellos de botella en otros sectores de la cadena.

En segundo lugar, un aumento en la satisfacción de la demanda produjo, en general, una disminución del beneficio económico, exponiendo de esta forma una relación conflictiva entre los dos objetivos. Esto pudo verse claramente con la variación de la cantidad de cámaras de atmósfera controlada.

El volumen total de fruta procesada aumentó por los cambios propuestos en la estructura, a excepción de los correspondientes a la cantidad de cámaras de atmósfera controlada en los que no se observó variación. Cabe señalar que en todos estos casos, la fruta adicional procesada se debe adquirir a través de terceros proveedores de fruta fresca.

El cambio en la cantidad de cámaras de frío convencional favoreció principalmente a las variedades más rentables, sobre todo en la primera parte del año. Los inventarios de fruta no procesada aumentaron en mayor medida que lo que lo hicieron los correspondientes a la fruta procesada, revelando la aparición de un cuello de botella en la capacidad de procesamiento. También se encontró una disminución de la utilización de los recursos de frío del puerto, aún ante un aumento el volumen comercializado a ultramar.

El cambio en la cantidad de cámaras de atmósfera controlada, favoreció la participación de otro tipo de variedades. El hecho de que el aumento de la capacidad de este tipo de frío permite contar con fruta en la segunda parte del año, produce que las variedades que en esta porción del horizonte de planeamiento presentan mayores demanda y margen de rentabilidad, sean procesadas con preferencia. Para lograr esto es necesario resignar la asignación de recursos a las variedades rentables en la primera parte del año. El aumento de este tipo de cámaras produjo que los perfiles de stock de fruta en atmósfera controlada cubrieran una mayor proporción del horizonte de planeamiento.

Con el aumento de la capacidad de procesamiento, se observó una disminución sostenida del almacenamiento en frío de fruta no procesada, permitiendo disminuir el costo de almacenar fruta con descarte. De todas las opciones de frío, el almacenamiento en puerto fue el que más representatividad ganó, explicado por el aumento del volumen comercializado a ultramar y por la limitación de los recursos de almacenamiento propio.

El análisis de la capacidad de transporte, mostró que a baja disponibilidad de este recurso, se propusieron estrategias diferentes de almacenamiento en el galpón de empaque con el fin de distribuir la oferta a lo largo del año. Aumentaron los niveles de stock de fruta procesada y disminuyeron a una velocidad menor. Las cámaras de

atmósfera controlada fueron llenadas a partir de períodos más tempranos y de forma escalonada. Esto último se repitió en el proceso de vaciado de las mismas, de forma tal de resignar el menor volumen de venta posible.

En lo relativo a los mercados de comercialización, en todos los escenarios se encontró una clara tendencia a enviar manzana a la **UE**, sobre todo v_4 . El resto de los mercados a ultramar no mostró diferencias positivas con respecto a la demanda. En **Brasil**, no se observaron envíos por encima de lo demandado en manzanas, mientras que en el caso de las peras, el mercado de **Brasil** se vio favorecido con el aumento de las diferentes capacidades. Dependiendo en que porción del horizonte de planeamiento tiene efecto la capacidad en cuestión, se prefirió una variedad más temprana, como lo es v_5 , o una variedad con mejores propiedades de almacenamiento, v_6 .

Los volúmenes de venta comercializados al **MI**, pusieron de manifiesto falencias importantes en lo que respecta a la posibilidad de colocación de la fruta. Como se mencionó anteriormente, v_4 fue preferentemente seleccionada en la mayoría de los casos estudiados para comercializarse en la **UE**, lo que obliga a comerciar el remanente de menor calidad en el **MI**. Este escenario se repitió tanto con v_7 como con v_8 , todas variedades que presentan altos márgenes de rentabilidad en la **UE**, pero que no tienen gran aceptación en el **MI**. En consecuencia, es necesario buscar la forma de introducirlas en mayor proporción en este mercado si es que se quiere aprovechar el margen de rentabilidad que se logran en los mercados de ultramar. De todas formas, la implementación de esta diversificación de la demanda del **MI** no es una tarea fácil, dado que el mercado argentino está acostumbrado justamente a las variedades que en la actualidad presentan menor margen de rentabilidad y mayor dificultad de inserción en el resto de los mercados de exportación.

Capítulo 5

Planeamiento operativo

5.1. Introducción

En este capítulo se abordará el problema del planeamiento operativo de la cadena de suministro de la fruta. En general, a medida que se desciende en la pirámide de toma de decisiones (Figura 1.1), los problemas de planeamiento resultantes son más complejos de resolver. Por un lado, la subdivisión del horizonte de planeamiento se hace en períodos de menor longitud, con el consecuente aumento de tamaño del problema. Por otro, se deben incluir aspectos operativos que en los problemas de planeamiento superiores no son tenidos en cuenta, resultando en una mayor complejidad del modelo. En consecuencia, muchos de estos problemas resultan imposibles de resolver de forma exacta con la capacidad computacional y algoritmos de optimización actuales (Li y Ierapetritou, 2010; Kreipl y Pinedo, 2004; Al-Ameri y otros, 2008).

Como objetivo de este capítulo se plantea resolver una instancia de planeamiento operativo de la cadena de suministro de la fruta haciendo uso de información proporcionada por el modelo de planeamiento táctico (Capítulo 4). Para ello, en una primera instancia se propondrá una función objetivo que permita simultáneamente hacer un uso eficiente de los recursos disponibles (minimizar costos) y aprovechar la información generada por el nivel superior de planeamiento (programa de envíos).

Posteriormente, dado el costo computacional que conlleva resolver el problema original, se presenta una estrategia de resolución del tipo horizonte móvil con el objetivo de obtener una mejor relación entre la calidad de la solución y el tiempo de cómputo. Finalmente, se estudia la relación de compromiso existente entre la adecuación

a la información provista por el planeamiento táctico y la necesidad de recursos económicos para lograrlo.

5.2. Descripción del problema

5.2.1. Consideraciones del modelo de planeamiento operativo

Tanto el modelo de planeamiento operativo (MPO) como el modelo de planeamiento táctico (MPT) han sido desarrollados sobre la misma conceptualización de la CS. La principal diferencia entre ellos radica en la discretización del horizonte de planeamiento que, para el caso del MPO, es diaria. En consecuencia, todo lo explicado oportunamente en la Sección 4.2 aplica también para este capítulo. Asimismo, gran parte de las ecuaciones del MPT explicadas en detalle en el Apéndice D, son válidas también en el MPO si se cambia el índice correspondiente al período de planeamiento. Allí, para indicar que una dada ecuación es válida para ambos modelos, se incluyó la letra griega τ en el lugar correspondiente al índice del período de planeamiento táctico. De esta forma, si se está formulando el MPT dicho símbolo debe ser remplazado por p , mientras que debe ser remplazado por t en el MPO.

Sin embargo, la totalidad del MPO no queda descripta por el solo hecho de cambiar el índice del período de planeamiento. Gracias a la discretización diaria, hay aspectos de la operatoria de la CS que el MPO puede representar en detalle, mientras que el MPT solo podía hacerlo de forma aproximada. A continuación se proporciona un detalle de dichas diferencias.

- En el MPO es posible restringir estrictamente el máximo de variedades a procesar diariamente por línea de clasificación a 1. De esta forma, la Ecuación D.12 del Apéndice es reformulada en la Ecuación 5.1 quitando del lado derecho la longitud del período de planeamiento táctico (L_p).

$$\sum_{v \in HCS_{vt}} Y_{lvt}^{pl} \leq 1 \quad \forall t \in HCS''_t \quad (5.1)$$

- En la Ecuación D.17 del MPT no se puede controlar que el plazo mínimo de contratación de mano de obra sea exactamente de 15 días debido a que la longitud de los períodos de planeamiento no es uniforme. En el MPO es posible hacerlo en forma exacta, declarando que J sea igual a 15.

- La Sección del MPO relacionada a la operatoria de cámaras de FC es la que más modificaciones sufre con respecto a la correspondiente del MPT (Sección D.3.1). En primer lugar, en el MPO es posible controlar día a día tanto el tipo de fruta como la especie almacenada. Para ello se declaran dos nuevos conjuntos de variables binarias: Por un lado, Y_{ct}^{fnp} vale 1 cuando dentro de la cámara de FC hay fruta sin clasificar, mientras que Y_{ct}^{fp} toma el valor 1 cuando lo que se almacena es fruta procesada. Por otro, la variable Y_{cet}^{ce} controla si lo que se almacena es manzana o pera. Con ellas y con el auxilio de la variable Y_{ct}^c , que vale 1 cuando la cámara está siendo utilizada, se formulan las Ecuaciones 5.2 y 5.3 que restringen la cantidad de especies y el tipo de fruta que se puede almacenar por cámara por período, respectivamente.

$$\sum_{e \in HCS'_{et}} Y_{cet}^{ce} = Y_{ct}^c \quad \forall c, t \in HCS''_t \quad (5.2)$$

$$Y_{ct}^{fnp} + Y_{ct}^{fp} = Y_{ct}^c \quad \forall c, t \in HCS''_t \quad (5.3)$$

El hecho de poder distinguir lo que hay dentro de las cámaras con exactitud, provoca que las Ecuaciones D.25 y D.26 correspondiente a las cotas de stock dentro de cada una de las cámaras dejen de ser válidas para este modelo y deban reformularse en las Ecuaciones 5.4 a 5.8 a fin de que los stocks no nulos sean únicamente aquellos correspondientes al tipo de fruta y a la especie almacenada. Dado que la densidad de almacenamiento de las peras y las manzanas es diferente, la capacidad máxima de almacenamiento es función de la especie. Como en las Ecuaciones 5.4 y 5.6 aún no se distingue cuál es la especie almacenada, la cota máxima de la cámara es la mayor de las dos (corresponde al límite impuesto por la pera. Tabla E.5). Por su parte, la capacidad mínima es única y se incluye para evitar que la solución proponga guardar cantidades muy pequeñas de fruta dentro de una cámara (Ecuaciones 5.5 y 5.7). Finalmente, la Ecuación 5.8 identifica la especie almacenada dentro de la cámara, por lo que puede limitar con exactitud la cantidad máxima de fruta.

$$\sum_{v \in HCS_{vt}} S_{cvt}^{fnp} \leq \max(e, \overline{S_{ce}^c}) \cdot Y_{ct}^{fnp} \quad \forall c, t \in HCS''_t \quad (5.4)$$

$$\sum_{v \in HCS_{vt}} S_{cvt}^{fnp} \geq \underline{S_c} \cdot Y_{ct}^{fnp} \quad \forall c, t \in HCS''_t \quad (5.5)$$

$$\sum_{v \in HCS_{vt}} S_{cqv}^{fp} \leq \max(e, \overline{S_{ce}^c}) \cdot Y_{ct}^{fp} \quad \forall c, t \in HCS''_t \quad (5.6)$$

$$\sum_{v \in HCS_{vt}} S_{cqv}^{fp} \geq \underline{S_c} \cdot Y_{ct}^{fp} \quad \forall c, t \in HCS''_t \quad (5.7)$$

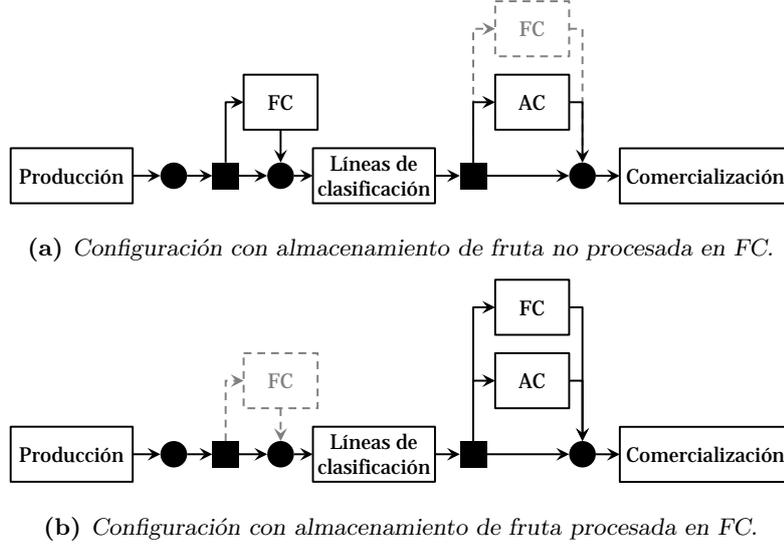


Figura 5.1 – Cambio de configuración del sistema en función del tipo de fruta almacenado en cámara de FC en caso de haber una única cámara. La línea sólida indica la configuración actual, mientras que la línea punteada muestra la otra posibilidad.

$$\sum_{v \in (EV_{ev} \wedge HCS_{vt})} \left(S_{cvt}^{fnp} + \sum_q S_{cqv}^{fp} \right) \leq \overline{S}_{ce}^c \cdot Y_{cet}^{ce} \quad \forall c, (e, t) \in HCS'_{et} \quad (5.8)$$

Cabe destacar que dependiendo del tipo de fruta que se almacene dentro de las cámaras, la configuración del sistema cambia. En la Figura 5.1 se muestran los dos escenarios posibles en caso de que haya una única cámara de FC. Si la cámara está siendo utilizada para almacenar fruta sin procesar (Figura 5.1a), la fruta clasificada podrá enviarse solamente a las cámaras de AC, o bien ser comercializada. Por otra parte, si la cámara es utilizada para almacenar fruta procesada (Figura 5.1b), la fruta que llega al galpón de empaque necesariamente debe ser procesada. Con el aumento de cámaras de FC los escenarios posibles se multiplican siguiendo la misma lógica.

Por otra parte, con el objetivo de asignar costos al encendido de las cámaras, y controlar el cambio de tipo de fruta y especie almacenada, se definieron un conjunto adicional de variables. En primer lugar, se declara la variable Y_{ct}^{ON} que valdrá uno en t únicamente si la cámara en el período $t - 1$ estaba apagada ($Y_{ct-1}^c = 0$) y es puesta en marcha en el período t ($Y_{ct}^c = 1$). Para representar correctamente esta situación, se desarrollaron las proposiciones que siguen a continuación con su representación matemática correspondiente (Ecuaciones 5.9 a 5.12). La totalidad de escenarios posibles se presentan en la Tabla 5.1, junto con el valor deseado para la variable Y_{ct}^{ON} y la evaluación de

Tabla 5.1 – Conjunto de escenarios posibles para la identificación del encendido de una cámara de FC, junto con el valor deseado de la variable Y_{ct}^{ON} y la evaluación de las ecuaciones desarrolladas para modelar las situaciones.

Escenario	Variables			Ecuaciones			
	Y_{ct-1}^c	Y_{ct}^c	Y_{ct}^{ON}	5.9	5.10	5.11	5.12
1	0	0	0	$Y_{ct}^{ON} \leq 0$	$Y_{ct}^{ON} \geq 0$	$Y_{ct}^{ON} \leq 1$	$Y_{ct}^{ON} \leq 2$
2	0	1	1	$Y_{ct}^{ON} \leq 1$	$Y_{ct}^{ON} \geq 1$	$Y_{ct}^{ON} \leq 2$	$Y_{ct}^{ON} \leq 1$
3	1	0	0	$Y_{ct}^{ON} \leq 1$	$Y_{ct}^{ON} \geq -1$	$Y_{ct}^{ON} \leq 0$	$Y_{ct}^{ON} \leq 1$
4	1	1	0	$Y_{ct}^{ON} \leq 2$	$Y_{ct}^{ON} \geq 0$	$Y_{ct}^{ON} \leq 1$	$Y_{ct}^{ON} \leq 0$

cada una de las ecuaciones desarrolladas. Allí se puede observar que a cada uno de los escenarios le corresponde una única ecuación. Cuando la ecuación no se corresponde al escenario formulado, la misma queda sin efecto.

$$\text{Escenario 1} \quad (\neg Y_{ct-1}^c \wedge \neg Y_{ct}^c) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{ON}$$

$$\text{Escenario 2} \quad (\neg Y_{ct-1}^c \wedge Y_{ct}^c) \Rightarrow Y_{ct}^{ON}$$

$$\text{Escenario 3} \quad (Y_{ct-1}^c \wedge \neg Y_{ct}^c) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{ON}$$

$$\text{Escenario 4} \quad (Y_{ct-1}^c \wedge Y_{ct}^c) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{ON}$$

$$Y_{ct}^{ON} \leq Y_{ct-1}^c + Y_{ct}^c \quad \forall (c, t) \in HCS_t'' \quad (5.9)$$

$$Y_{ct}^{ON} \geq Y_{ct}^c - Y_{ct-1}^c \quad \forall (c, t) \in HCS_t'' \quad (5.10)$$

$$Y_{ct}^{ON} \leq 1 + Y_{ct}^c - Y_{ct-1}^c \quad \forall (c, t) \in HCS_t'' \quad (5.11)$$

$$Y_{ct}^{ON} \leq 2 - Y_{ct-1}^c - Y_{ct}^c \quad \forall (c, t) \in HCS_t'' \quad (5.12)$$

De forma similar que para el caso del encendido de las cámaras, se declara la variable Y_{ct}^{CHf} para identificar si el tipo de fruta almacenada entre los períodos $t - 1$ y t ha cambiado. Y_{ct}^{CHf} valdrá 1 bajo dos circunstancias: si en el período $t - 1$ la cámara está ocupada por fruta no procesada ($Y_{ct-1}^{fnp} = 1$) y en el período t por fruta procesada ($Y_{ct}^{fpp} = 1$), o bien si en el período $t - 1$ en la cámara hay fruta procesada ($Y_{ct-1}^{fpp} = 1$) y en t hay fruta no procesada ($Y_{ct}^{fnp} = 1$). Igualmente, la variable Y_{ct}^{CHe} identifica que la especie almacenada entre los períodos $t - 1$ y t es diferente.

A continuación desarrollamos las proposiciones de las posibles combinaciones para el caso en el que cambia el tipo de fruta almacenada, junto con las ecuaciones correspondientes. Además, en la Tabla 5.2 se presentan todos los

escenarios posibles, así como el valor deseado de la variable Y_{ct}^{CHF} en cada uno de los casos y las evaluaciones de las ecuaciones formuladas. Hay que señalar que al momento de plantear las situaciones, se tiene presente que en un dado período no se pueden almacenar ambos tipos de fruta simultáneamente.

$$\begin{aligned}
\text{Escenario 1} & \quad (\neg Y_{ct-1}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct-1}^{fp} \wedge \neg Y_{ct}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{\text{CHF}} \\
\text{Escenario 2} & \quad (\neg Y_{ct-1}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct-1}^{fp} \wedge \neg Y_{ct}^{fnp} \wedge Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{\text{CHF}} \\
\text{Escenario 3} & \quad (\neg Y_{ct-1}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct-1}^{fp} \wedge Y_{ct}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{\text{CHF}} \\
\text{Escenario 4} & \quad (\neg Y_{ct-1}^{fnp} \wedge Y_{ct-1}^{fp} \wedge \neg Y_{ct}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{\text{CHF}} \\
\text{Escenario 5} & \quad (Y_{ct-1}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct-1}^{fp} \wedge \neg Y_{ct}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{\text{CHF}} \\
\text{Escenario 6} & \quad (\neg Y_{ct-1}^{fnp} \wedge Y_{ct-1}^{fp} \wedge \neg Y_{ct}^{fnp} \wedge Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{\text{CHF}} \\
\text{Escenario 7} & \quad (Y_{ct-1}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct-1}^{fp} \wedge Y_{ct}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow \neg Y_{ct}^{\text{CHF}} \\
\text{Escenario 8} & \quad (\neg Y_{ct-1}^{fnp} \wedge Y_{ct-1}^{fp} \wedge Y_{ct}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow Y_{ct}^{\text{CHF}} \\
\text{Escenario 9} & \quad (Y_{ct-1}^{fnp} \wedge \neg Y_{ct-1}^{fp} \wedge \neg Y_{ct}^{fnp} \wedge Y_{ct}^{fp}) \Rightarrow Y_{ct}^{\text{CHF}}
\end{aligned}$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \leq Y_{ct-1}^{fnp} + Y_{ct-1}^{fp} + Y_{ct}^{fnp} + Y_{ct}^{fp} \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.13)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \leq 1 + Y_{ct-1}^{fnp} + Y_{ct-1}^{fp} + Y_{ct}^{fnp} - Y_{ct}^{fp} \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.14)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \leq 1 + Y_{ct-1}^{fnp} + Y_{ct-1}^{fp} + Y_{ct}^{fp} - Y_{ct}^{fnp} \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.15)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \leq 1 + Y_{ct-1}^{fnp} + Y_{ct}^{fnp} + Y_{ct}^{fp} - Y_{ct-1}^{fp} \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.16)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \leq 1 + Y_{ct-1}^{fp} + Y_{ct}^{fnp} + Y_{ct}^{fp} - Y_{ct-1}^{fnp} \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.17)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \leq 2 + Y_{ct-1}^{fnp} + Y_{ct}^{fnp} - Y_{ct-1}^{fp} - Y_{ct}^{fp} \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.18)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \leq 2 + Y_{ct-1}^{fp} + Y_{ct}^{fp} - Y_{ct-1}^{fnp} - Y_{ct}^{fnp} \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.19)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \geq Y_{ct-1}^{fp} + Y_{ct}^{fnp} - Y_{ct-1}^{fnp} - Y_{ct}^{fp} - 1 \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.20)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHF}} \geq Y_{ct-1}^{fnp} + Y_{ct}^{fp} - Y_{ct-1}^{fp} - Y_{ct}^{fnp} - 1 \quad \forall (c, t) \in HCS''_t \quad (5.21)$$

Cuando lo que cambia es la especie almacenada, la situación es totalmente equivalente a la anterior. Debido a esto, presentaremos las ecuaciones adicionadas al MPO sin la inclusión de las proposiciones de las que derivan (Ecuaciones 5.22 a 5.30).

Tabla 5.2 – Conjunto de escenarios posibles para la identificación del cambio de tipo de fruta almacenada en una cámara de FC, junto con el valor deseado de la variable Y_{ct}^{CHF} y la evaluación de las ecuaciones desarrolladas para modelar las situaciones.

Escenario	Variables				Ecuaciones									
	Y_{ct-1}^{fnp}	Y_{ct-1}^{fp}	Y_{ct}^{fnp}	Y_{ct}^{fp}	Y_{ct}^{CHF}	5.13	5.14	5.15	5.16	5.17	5.18	5.19	5.20	5.21
1	0	0	0	0	0	$Y_{ct}^{CHF} \leq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -1$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -1$
2	0	0	0	1	0	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -2$	$Y_{ct}^{CHF} \geq 0$
3	0	0	1	0	0	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \geq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -2$
4	0	1	0	0	0	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \geq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -2$
5	1	0	0	0	0	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -2$	$Y_{ct}^{CHF} \geq 0$
6	0	1	0	1	0	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 4$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -1$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -1$
7	1	0	1	0	0	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 4$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 0$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -1$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -1$
8	0	1	1	0	1	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \geq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -3$
9	1	0	0	1	1	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 3$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 1$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \leq 2$	$Y_{ct}^{CHF} \geq -3$	$Y_{ct}^{CHF} \geq 1$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \leq Y_{ce_1t-1}^{ce} + Y_{ce_2t-1}^{ce} + Y_{ce_1t}^{ce} + Y_{ce_2t}^{ce} \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.22)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \leq 1 + Y_{ce_1t-1}^{ce} + Y_{ce_2t-1}^{ce} + Y_{ce_1t}^{ce} - Y_{ce_2t}^{ce} \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.23)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \leq 1 + Y_{ce_1t-1}^{ce} + Y_{ce_2t-1}^{ce} + Y_{ce_2t}^{ce} - Y_{ce_1t}^{ce} \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.24)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \leq 1 + Y_{ce_1t-1}^{ce} + Y_{ce_1t}^{ce} + Y_{ce_2t}^{ce} - Y_{ce_2t-1}^{ce} \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.25)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \leq 1 + Y_{ce_2t-1}^{ce} + Y_{ce_1t}^{ce} + Y_{ce_2t}^{ce} - Y_{ce_1t-1}^{ce} \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.26)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \leq 2 + Y_{ce_1t-1}^{ce} + Y_{ce_1t}^{ce} - Y_{ce_2t-1}^{ce} - Y_{ce_2t}^{ce} \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.27)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \leq 2 + Y_{ce_2t-1}^{ce} + Y_{ce_2t}^{ce} - Y_{ce_1t-1}^{ce} - Y_{ce_1t}^{ce} \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.28)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \geq Y_{ce_2t-1}^{ce} + Y_{ce_1t}^{ce} - Y_{ce_1t-1}^{ce} - Y_{ce_2t}^{ce} - 1 \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.29)$$

$$Y_{ct}^{\text{CHe}} \geq Y_{ce_1t-1}^{ce} + Y_{ce_2t}^{ce} - Y_{ce_2t-1}^{ce} - Y_{ce_1t}^{ce} - 1 \quad \forall(c, t) \in HCS_t'' \quad (5.30)$$

- La operatoria de las cámaras de AC puede ser representada adecuadamente tanto en el MPT como en el MPO. La única diferencia radica en la longitud de los plazos correspondientes a las distintas etapas de la operatoria. Al igual que en el caso de los plazos mínimos de contratación de mano de obra, en el MPT la duración de las etapas es tomada en cuenta de forma aproximada (períodos grandes no uniformes), mientras que en el MPO puede llevarse a cabo exactamente (períodos diarios). Las ecuaciones de esta sección no sufren modificación, solamente se cambian los parámetros correspondientes a los plazos mínimos y máximos de la duración de las etapas. De esta forma en la Ecuación D.29 $\overline{\Delta p}^f$ es reemplazado por $\overline{\Delta t}^f$; en las Ecuaciones D.30, D.31 y D.34 $\underline{\Delta p}^c$ es sustituido por $\underline{\Delta t}^c$; y en la Ecuación D.32 $\overline{\Delta p}^p$ es cambiado por $\overline{\Delta t}^p$.
- Las Ecuaciones D.67 y D.68 de la Sección D.4.2 no son incluidas en el MPO, ya que se encargan de relacionar los volúmenes de venta con los perfiles de demanda proporcionados. Veremos más adelante que en el MPO se busca seguir a los perfiles de venta proporcionados por el MPT, en lugar de los de demanda.
- En lo que respecta a los costos generados por las distintas actividades consideradas, aquellos que en su cálculo en el MPT involucran la longitud del período de planeamiento deben ser modificados. De esta forma la Ecuación D.72, asociada al costo de mano de obra, las Ecuaciones D.74 y D.75 que calculan los costos variables y fijos del almacenamiento de fruta en FC, las Ecuaciones D.76 y D.77 que hacen lo propio con las cámaras de AC, y la Ecuación D.79 que determina el costo de la utilización de las cámaras frigoríficas del puerto, que-

dan redefinidas en las Ecuaciones 5.31 a 5.36, respectivamente. Asimismo, el encendido de las cámaras de FC, como los cambios de tipo de fruta y especie almacenada son penalizados con los costos C_t^{on} , C_t^{ch} , respectivamente (Ecuaciones 5.37 y 5.38).

$$C_t^{mp} = \sum_s (c_s^{mp} \cdot Y_{st}^{tu}) \quad \forall t \in HCS_t'' \quad (5.31)$$

$$C_t^c = \sum_e \left(c_e^c \cdot \sum_{v \in (EV_{ev} \wedge HCS_{vt})} \left(S_{cvt}^{fnp} + \sum_q S_{cqv}^{fcp} \right) \right) \quad \forall t \in HCS_t'' \quad (5.32)$$

$$FC_t^c = fc \cdot \sum_c Y_{ct}^c \quad \forall t \in HCS_t'' \quad (5.33)$$

$$C_t^a = \sum_{eq} \left(c_{eq}^a \cdot \sum_{v \in (EV_{ev} \wedge HS_{vt})} S_{aqt}^a \right) \quad \forall t \in HS_t'' \quad (5.34)$$

$$FC_t^a = fc \cdot \sum_a \left(Y_{at}^f \Big|_{ICA_t''} + Y_{at}^c + Y_{at}^p \Big|_{OCA_t''} \right) \quad \forall t \in HS_t'' \quad (5.35)$$

$$C_t^{hc} = \sum_{h \in OH_{ht}''} \left(c_h^{hc} \cdot \sum_{v \in OH_{hvt}} S_{hvt}^{hc} \right) \quad \forall t \in OH_t''' \quad (5.36)$$

$$C_t^{on} = c^{on} \cdot \sum_c Y_{ct}^{ON} \quad \forall t \in HS_t'' \quad (5.37)$$

$$C_t^{ch} = \sum_c \left(c_{ff'}^{ch1} \cdot Y_{ct}^{CHf} + c_{ee'}^{ch2} \cdot Y_{ct}^{CHe} \right) \quad \forall t \in HS_t'' \quad (5.38)$$

- Finalmente, las funciones objetivos de ambos modelos difieren. La correspondiente al MPO será presentada en la Sección 5.2.2.

5.2.2. Objetivos del planeamiento operativo

Como se mencionó anteriormente, en el MPO se busca simultáneamente hacer un uso eficiente de los recursos disponibles e implementar en la medida de lo posible el perfil de ventas proporcionado por el MPT. Para lograr esto, se propone una función objetivo (z_{MPO}) que contempla ambos aspectos. La misma es presentada en la Ecuación 5.39. Cabe mencionar que se ha evaluado el desempeño de una gran variedad de funciones objetivo a lo largo del proyecto. La adoptada en este capítulo es la que mejor resultado nos ha dado en lo que respecta a calidad de solución y tiempos de cómputo.

$$z_{MPO} = C^T + \sum_{m_3vp} \phi_{m_3vp} \cdot \delta SS_{m_3vp}^- \quad (5.39)$$

C^T corresponde a los costos totales generados por las diversas actividades consideradas, mientras que el segundo término está asociado a la medición del apartamiento de las ventas realizadas por el MPO con respecto a los perfiles dictados por el MPT. ϕ_{m_3vp} es el precio de venta de la variedad v en el mercado m_3 (este índice incluye todos los mercados de comercialización considerados: UE, Rusia, USA, Brasil y MI) en el período p , y $\delta SS_{m_3vp}^-$ corresponde a la diferencia negativa de ventas entre lo dictado por el MPT y la solución del MPO (Ecuación 5.41). Con la inclusión de ϕ_{m_3vp} se busca que la Ecuación 5.39 quede expresada en su totalidad en términos monetarios y se penalice con mayor intensidad el incumplimiento de las ventas más rentables.

En la Ecuación 5.40 se detalla el cálculo de C^T correspondiente a la suma de la contribución de los distintos costos considerados.

$$C^T = \sum_{t \in HS_t''} \left(\begin{aligned} & \left(C_t^{pp} + C_t^{p3s} \right) \Big|_{HP_t''} - C_t^{hc} \Big|_{OH_t'''} \\ & + \left(C_t^{mp} + C_t^c + C_t^{on} + C_t^{ch} + FC_t^c \right) \Big|_{HCS_t''} \\ & + C_t^{pack} + C_t^a + FC_t^a + C_t^{log} \end{aligned} \right) + C^{am} + C^{ov} \quad (5.40)$$

C_t^{pp} es el costo de producción de la fruta en las chacras propias (Ecuación D.69), C_t^{p3s} es el costo de compra de fruta a terceros (Ecuación D.70), C_t^{hc} es el costo de almacenamiento de la fruta en los puertos (Ecuación 5.36), C_t^{mp} es el costo de mano de obra en las líneas de clasificación del galpón de empaque (Ecuación 5.31), C_t^c es el costo variable de almacenamiento de la fruta en FC (Ecuación 5.32), C_t^{on} es el costo de encendido de las cámaras de FC (Ecuación 5.37), C_t^{ch} es el costo generado por cambiar el tipo de fruta y la especie almacenada en cada una de las cámaras de FC (Ecuación 5.38), FC_t^c es el costo fijo asociado al funcionamiento de las cámaras de FC (Ecuación 5.33), C_t^{pack} el costo generado durante el proceso de clasificación y empaque (Ecuación D.71), C_t^a es el costo de almacenamiento en AC (Ecuación 5.34), FC_t^a es el costo fijo relacionado a la utilización de las cámaras de AC (Ecuación 5.35), C_t^{log} es el costo de logística y comercialización (Ecuación D.78), C^{am} son las amortizaciones (Ecuación D.73) y C^{ov} los gastos generales (Ecuación D.80).

Por su parte, $\delta SS_{m_3vp}^-$ es el último término de la derecha de la relación de la Ecuación 5.41.

$$\sum_{t \in r_{pt}} SS_{m_3vt} = SS_{m_3vp}^{MPT} + \delta SS_{m_3vp}^+ - \delta SS_{m_3vp}^- \quad \forall(m_3vp) \quad (5.41)$$

El miembro de la izquierda realiza la sumatoria en t para cada uno de los períodos del planeamiento táctico mediante r_{pt} , el cual relaciona los períodos de ambos horizontes, para que los volúmenes de venta propuestos por ambos modelos quedan expresados en las mismas unidades de tiempo. Por su parte, $SS_{m_3vp}^{\text{MPT}}$ corresponde a los volúmenes de venta proporcionados por el MPT. De esta forma, si $\delta SS_{m_3vp}^+$ es mayor a 0 indica que el volumen de venta calculado por el MPO para m_3 de v en p es mayor a lo predicho por el MPT, mientras que si $\delta SS_{m_3vp}^-$ es mayor a 0 la venta realizada por el MPO no alcanza el nivel dictado por el MPT.

Cabe mencionar que en la función objetivo (Ecuación 5.39) se ha decidido penalizar únicamente las desviaciones negativas de las ventas del MPO con respecto al MPT. Esto último surge de que al incluirse también los costos (C^T) en la función objetivo, naturalmente tiende a no realizarse ventas por encima de lo propuesto por el MPT, dado que la actividad de producir y comercializar fruta necesariamente genera un costo.

De esta forma, el MPO resultante queda planteado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{mín} \quad & z_{\text{MPO}} \\ \text{s.t} \quad & \text{D.1–D.81} \\ & \text{5.1–5.41} \end{aligned} \tag{5.42}$$

El modelo formulado es del tipo determinístico multi-período MILP, fue implementado en la plataforma de modelado y optimización GAMS 23.0 (Brooke y otros, 1988). Los estudios se resolvieron con una computadora con procesador Intel®Core™ 2 Quad Q8200 @ 2.33 GHz con 2.96 GB de memoria RAM. El modelo MILP resultante tiene 135.648 ecuaciones, 145.145 variables continuas y 7.002 variables binarias

5.2.3. Resolución del MPO

Con el objetivo de presentar la motivación de la formulación de una estrategia de resolución más eficiente, se reportan datos correspondientes a dos intentos de resolución del MPO (5.43). En el primer caso se utilizó como algoritmo de optimización CPLEX, mientras que en el segundo se optó por GUROBI (GAMS, 2009). En la Tabla 5.3 se presentan los tiempos de cómputo, valores alcanzados de z_{MPO} , costos totales (C^T) y porcentajes de los perfiles de venta que no son respetados por el MPO (INC_{MPO}) obtenidos en ambas pruebas.

Tabla 5.3 – Resultados generales obtenidos en la resolución de la formulación original del MPO.

	Solver	
	CPLEX	GUROBI
Tiempo de cómputo(hh:mm:ss)	18:41:34.634	21:41:55.147
z_{MPO} ($10^6\text{U}\$\$$)	18.70	–
gap absoluto ($10^6\text{U}\$\$$)	3.97	–
gap relativo	0.21	–
C^T ($10^6\text{U}\$\$$)	10.11	–
INC_{MPO} (%)	50.37	–

En ambos escenarios GAMS interrumpe el proceso de optimización con sendos mensajes de error. El primero asociado a que CPLEX se ha quedado sin memoria, por lo que el algoritmo fija el valor de las variables binarias de la solución actual y resuelve el problema LP final arrojando la solución presentada en la Tabla 5.3. Por su parte, GUROBI alcanza el límite máximo de iteraciones impuesto sin haber encontrado ninguna solución entera, consecuentemente no se reporta ningún resultado. A causa de esto último, en lo subsiguiente al hacer referencia a la resolución del MPO original, se estará haciendo mención de la solución encontrada por CPLEX.

En este punto quisiéramos enfatizar que estamos más interesados en mejorar el desempeño del modelo en lo que respecta a tiempo de computo que en lo relacionado al resultado de la optimización en sí misma. Es por esto que, aún entendiendo que los problemas reportados previamente relacionados a los algoritmos de resolución podrían llegar a resolverse cambiando las especificaciones por defecto de los solvers, decidimos abordar el problema desde otro punto de vista, proponiendo una estrategia de resolución que nos permita mejorar en el apartado de tiempo de resolución.

5.2.4. Estrategia de resolución

Debido a los prolongados tiempos de cómputo encontrados a la hora de resolver directamente el MPO, se decidió implementar una estrategia de resolución que permitiera obtener una solución aceptable en un tiempo de cómputo razonable. Como se mencionó anteriormente, la estrategia de resolución propuesta consiste en resolver de forma secuencial problemas simplificados del MPO original aplicando un enfoque del tipo RH. Adicionalmente, mediante el agregado de restricciones, se proporciona información generada por el MPT en relación a la operatoria de cámaras de AC.

En nuestro caso, al tratarse de un modelo determinístico, la justificación de la utilización de este enfoque es la de simplificar la resolución del modelo de planeamiento resultante. Debemos probar además que, gracias a la utilización de información generada por el planeamiento táctico, encontramos soluciones que son aceptables en términos de calidad. En este contexto, en el trabajo presentado por [Kostin y otros \(2011a\)](#) proponen la utilización de esta estrategia para reducir el tiempo computacional necesario para resolver un problema de planeamiento de diseño de la cadena de suministro de la caña de azúcar en Argentina.

Enfoque RH

Los algoritmos del tipo RH se basan en la desagregación del problema de planeamiento en una secuencia de etapas que se resuelven iterativamente, cada una de la cual modela solo parte del horizonte de planeamiento en detalle, mientras que el resto del horizonte es considerado de forma aproximada. En este trabajo, el MPO se aproxima considerando que las variables binarias, en la parte del horizonte de planeamiento aproximada, son continuas acotadas entre 0 y 1.

Por su parte, para un dado horizonte de planeamiento, el número total de iteraciones (K) a realizar por el método estará dictado por la cantidad de intervalos en los que el horizonte ha sido dividido (I). En nuestro caso, hemos dividido el horizonte del MPO en la misma cantidad de intervalos que los correspondientes períodos del MPT. De esta forma, las variables del MPO pertenecientes a un dado período del MPT –relacionadas entre sí por el parámetro r_{pt} – quedan asociadas a un mismo intervalo (I) del RH.

Posteriormente, para reconocer cómo debe considerar el modelo a las variables binarias, se definen tres bloques de intervalos:

- Bloque fijo (RH_t^1): Las variables binarias de este bloque tienen valores fijos resultantes de las soluciones halladas en iteraciones anteriores. Estas variables se encuentran ubicadas en intervalos previos al intervalo de la iteración actual ($I < k$).
- Bloque binario (RH_t^2): Comprende las variables binarias presentes en el intervalo de la iteración actual ($I = k$).
- Bloque relajado (RH_t^3): Comprende todos los intervalos más allá del correspondiente a la iteración actual ($I > k$). Las variables binarias seleccionadas son relajadas y tratadas como continuas. Pueden tomar valores entre 0 y 1.

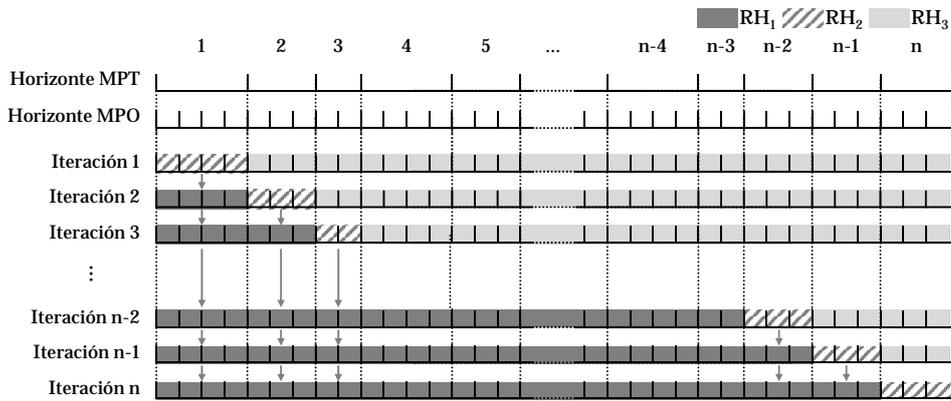


Figura 5.2 – Esquema de la estrategia RH utilizada.

En la Figura 5.2 se muestra como, a medida que se avanza con el procedimiento, los bloques son redefinidos de iteración en iteración. De esta forma, la longitud del bloque RH_t^1 va creciendo, ocupando el espacio cedido por RH_t^2 a medida que éste se desplaza hacia la derecha sobre nuevos intervalos. En consecuencia, RH_t^3 disminuye su participación en el horizonte de planeamiento hasta que desaparece en la última iteración.

Además, para poder implementar correctamente la estrategia adoptada es necesario descomponer cada una de las variables binarias del modelo –representadas aquí con Y_t^* de forma general– en tres: Y_t^p , Y_t^b e Y_t^c . Dependiendo de la iteración en la que se encuentre el procedimiento y al intervalo al que dicha variable pertenezca, Y_t^* será considerada un parámetro (RH_t^1), una variable binaria (RH_t^2), o una continua (RH_t^3).

$$Y_t^* = Y_t^p \Big|_{RH_t^1} + Y_t^b \Big|_{RH_t^2} + Y_t^c \Big|_{RH_t^3} \quad (5.43)$$

Una vez definidos los bloques de intervalos y la descomposición de las variables binarias, es posible formular el procedimiento de RH, presentado en la Figura 5.3. El procedimiento comienza iniciando el contador de iteraciones, posteriormente se definen los bloques de intervalos y se resuelve el MPO considerando la descomposición de las variables binarias (Ecuación 5.43). Una vez resuelto el modelo a optimalidad, se actualizan los valores de Y_t^p de forma tal de incluir los valores de las variables binarias correspondientes a la iteración actual (Y_t^b). Si se ha completado la totalidad del horizonte de planeamiento ($k = P$), entonces el proceso finaliza arrojando como resultado la última solución obtenida. De no ser así, el contador de iteraciones se actualiza y el proceso se repite comenzando por la definición de los bloques de intervalos.

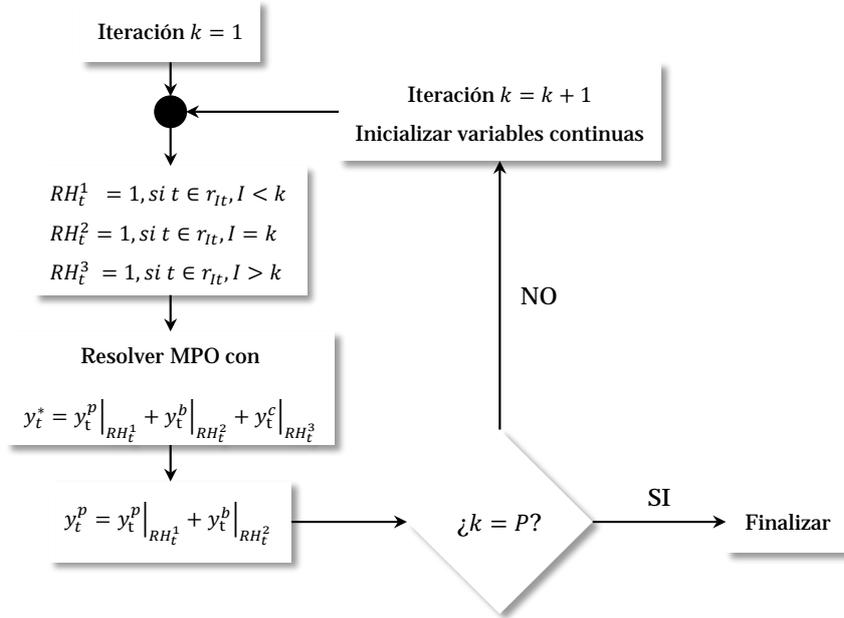


Figura 5.3 – Diagrama de flujo correspondiente al enfoque propuesto de RH.

De este modo, en la primera iteración del procedimiento el primer bloque de intervalos (RH_t^1) estará vacío, las variables binarias relacionadas al primer intervalo serán efectivamente binarias ($Y_t^* = Y_t^b$), mientras que las restantes serán consideradas continuas ($Y_t^* = Y_t^c$). Una vez resuelto el modelo, los valores correspondientes a las variables binarias quedan guardados para la próxima iteración en ($Y_t^* = Y_t^p$). En la segunda iteración, las variables binarias serán aquellas relacionadas al segundo intervalo, estarán fijas las anteriores y relajadas las posteriores. Se vuelve a resolver y se guardan los valores de las variables binarias del intervalo actual. De esta forma se sigue resolviendo iterativamente hasta completar la totalidad del horizonte de planeamiento.

Restricciones adicionales de la operatoria de AC

En este apartado presentaremos las restricciones adicionales que permiten al MPO seguir la operatoria de las cámaras de AC propuestas por la solución del MPT. Una de las razones que motiva la incorporación de estas restricciones es que la forma de operar las cámaras de AC no presenta una gran variabilidad de modelo a modelo. Como vimos en la Sección 4.2.5, todo el proceso queda descrito por 5 etapas, las cuales son secuenciales y tienen un orden preestablecido. A su vez, el objetivo de almacenar fruta dentro de este tipo de cámaras es abastecer al mercado en la

última parte del año, porción del horizonte de planeamiento donde no es posible llegar con fruta por otros medios. Por esta razón, si se busca seguir los perfiles de venta proporcionados por el MPT, los valores de las variables relacionadas a este tipo de frío en el MPO no deberían distar mucho de los calculados por el primero. Finalmente, con el agregado de estas restricciones se limita considerablemente el número de combinaciones posibles de las variables binarias correspondientes a la operatoria de las cámaras de AC, y se espera dé lugar a una reducción del tiempo de cómputo durante la resolución del MPO.

En primer lugar se establece que se debe respetar la especie que ha decidido almacenar el MPT en cada una de las cámaras (Ecuación 5.44).

$$Y_{ae}^{ae} = (Y_{ae}^{ae})^{\text{MPT}} \quad \forall a \quad (5.44)$$

En segundo lugar se dicta que el cierre y apertura de cada una de las cámaras debe realizarse durante el mismo período de planeamiento táctico calculado por el MPT (Ecuación 5.45 y 5.46, respectivamente).

$$\sum_{t \in r_{pt}} Y_{at}^{cp} = (Y_{ap}^{cp})^{\text{MPT}} \quad \forall(a, p) \quad (5.45)$$

$$\sum_{t \in r_{pt}} Y_{at}^{op} = (Y_{ap}^{op})^{\text{MPT}} \quad \forall(a, p) \quad (5.46)$$

El empleo de la estrategia RH con el agregado de las restricciones presentada anteriormente, será denominada de aquí en adelante RH-iAC.

En este caso, debido a la estrategia de resolución implementada y a que la longitud de los períodos del planeamiento táctico no es uniforme, el tamaño de los problemas resueltos en cada una de las iteraciones del método cambia. En la Tabla 5.4 se reporta el tamaño de cada una de las instancias resueltas. Se puede observar que el número de ecuaciones es el mismo, la cantidad de variables continuas disminuye a medida que el procedimiento avanza dado que la longitud del bloque de las variables binarias relajadas (RH_3) también disminuye. Por su parte, la cantidad de variables binarias en cada iteración está estrictamente asociado a la longitud del bloque RH_2 .

5.2.5. Consideraciones adicionales

Para poder evaluar el porcentaje en dólares del volumen de venta propuesto por el MPT que no es respetado por el MPO, se define el parámetro postsolve INC_{MPO} en

Tabla 5.4 – *Tamaño del modelo MPO utilizando RH-iAC.*

Iteración	Ecuaciones	Variables continuas	Variables discretas
1	135,648	145,145	215
2	135,648	145,145	436
3	135,648	144,924	320
4	135,648	144,819	353
5	135,648	144,681	315
6	135,648	144,581	377
7	135,648	144,419	360
8	135,648	144,274	389
9	135,648	144,100	331
10	135,648	143,984	418
11	135,648	143,781	618
12	135,648	143,378	618
13	135,648	142,975	512
14	135,648	142,678	611
15	135,648	142,282	620
16	135,648	141,877	698
17	135,648	141,394	512
18	135,648	141,097	611
19	135,648	140,701	360
20	135,648	140,556	377
21	135,648	140,394	315
22	135,648	140,294	675
23	135,648	139,834	362
24	135,648	139,687	530
25	135,648	139,372	443
26	135,648	139,144	305
27	135,648	139,054	305
28	135,648	138,964	305
29	135,648	138,874	305
30	135,648	138,784	305
31	135,648	138,694	305
32	135,648	138,604	305
33	135,648	138,514	305
34	135,648	138,424	281

la Ecuación 5.47.

$$INC_{\text{MPO}}(\%) = \frac{\sum_{m_3vp} \phi_{m_3vp} \cdot \delta SS_{m_3vp}^-}{\sum_{m_3vp} \phi_{m_3vp} \cdot SS_{m_3vp}^{\text{MPT}}} \cdot 100 \quad (5.47)$$

Por otra parte, para poder evaluar el efecto que tiene sobre los costos totales el hecho de cumplir en mayor medida con los perfiles de venta propuestos por el MPT, se incorpora un parámetro r a la Ecuación 5.39 para cambiar el peso del segundo término con respecto al primero (Ecuación 5.48).

$$z_{\text{MPO}}^r = C^T + r \cdot \sum_{m_3vp} \phi_{m_3vp} \cdot \delta SS_{m_3vp}^- \quad (5.48)$$

5.3. Casos de estudio

Para evaluar el desempeño de la estrategia de resolución propuesta con respecto al obtenido con la formulación detallada del MPO, así como también el efecto del agregado de restricciones relacionadas a la operatoria de cámaras de AC, y la influencia sobre los costos del hecho de tratar de ajustarse mejor a los perfiles de venta provistos por el MPT, se plantearon los siguientes casos de estudio:

- i) MPO mediante estrategia de resolución RH.
- ii) MPO mediante estrategia de resolución RH-iAC.
- iii) MPO con la misma estrategia del item anterior, y función objetivo modificada mediante el factor de peso r (Ecuación 5.48).

Para facilitar las comparaciones, se definió un caso base común a todos ellos. Adicionalmente, para poder hacer uso de la solución provista por el MPT, fue necesario adecuar la información de los 34 períodos del modelo de referencia a los 365 de MPO.

Finalmente, el resto de información necesaria para poder resolver los modelos formulados se encuentran en el Apéndice E.

5.4. Resultados y discusión

5.4.1. MPO mediante estrategia de resolución RH

En la Tabla 5.5 se reporta información relativa a la resolución del MPO con el empleo de la estrategia de resolución propuesta. Se reportan valores integrados para

Tabla 5.5 – Resultados generales obtenidos en la resolución MPO utilizando RH.

Tiempo de cómputo (hh:mm:ss)	9:10:40.500
z_{MPO} (10^6 U\$\$)	16.39
C^T (10^6 U\$\$)	10.56
INC_{MPO} (%)	34.22

los 34 problemas resueltos secuencialmente. Para cada una de los subproblemas se ha establecido como criterio de convergencia un gap relativo del 1 %.

Se observa que el tiempo de cómputo se ha visto reducido a más de la mitad con respecto al correspondiente a la formulación original del MPO. Por su parte, el valor de la función objetivo también resulta inferior, como consecuencia de un costo total de la operatoria de la CS levemente superior y una disminución en el nivel de incumplimiento de los perfiles de venta del MPT de más del 15 % con respecto a la formulación original.

Con el objetivo de ilustrar el funcionamiento de la estrategia RH, en la Figura 5.4 se muestra la evolución en el tiempo de las componentes de la función objetivo a medida que van finalizando las sucesivas iteraciones. Es necesario destacar, sin embargo, que ninguna de las soluciones alcanzadas en instancias previas a la iteración final puede considerarse solución factible del problema de planeamiento operativo original, dado que hay variables binarias que se encuentran relajadas.

En lo que respecta a la forma de las curvas de la Figura 5.4, la correspondiente a z_{MPO} , la variable objetivo, varía monótonamente, ya que a medida que se requiere integralidad sobre variables antes relajadas, el problema se vuelve más restrictivo. Debido a esto, necesariamente el valor alcanzado por dicha variable en una iteración anterior pasará a ser una cota inferior del modelo de la iteración actual. Sin embargo, dado que tanto C^T como INC_{MPO} son optimizadas indirectamente con z_{MPO} , presentan una evolución no monótona a medida que el algoritmo procede. De hecho, ambas curvas presentan altibajos en sus valores durante el proceso de resolución.

5.4.2. MPO mediante estrategia de resolución RH-iAC

En la Tabla 5.6 se presentan los resultados obtenidos con la utilización de la estrategia RH-iAC junto con el tiempo de cómputo necesario para completar la totalidad del procedimiento.

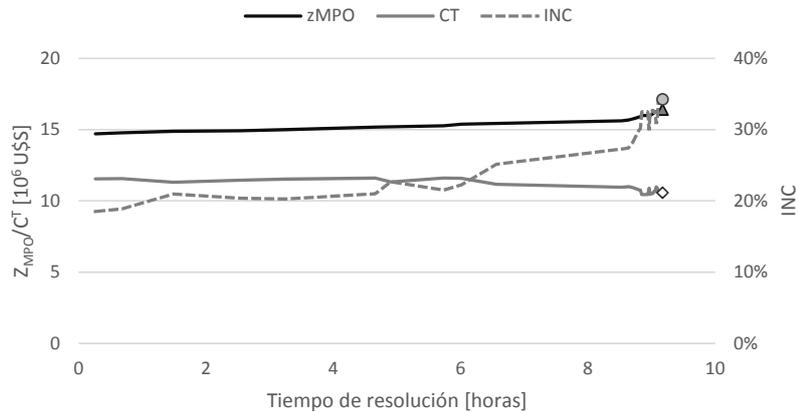


Figura 5.4 – Evolución en el tiempo de la estrategia RH. Se reporta sobre el eje izquierdo el valor de la variable objetivo así como también los costos totales (líneas sólidas). Sobre el eje derecho puede leerse el nivel de incumplimiento (línea punteada). Los puntos finales señalados con marcadores corresponden a la solución final alcanzada reportada en la Tabla 5.5.

Tabla 5.6 – Resultados generales obtenidos en la resolución MPO utilizando RH-iAC.

Tiempo de cómputo (hh:mm:ss)	3:21:46.454
z_{MPO} (10^6 U\$\$)	17.03
C^T (10^6 U\$\$)	11.66
INC_{MPO} (%)	31.49

Se puede observar que el agregado de las restricciones referidas a la operatoria de las cámaras de AC se traduce en una reducción considerable del tiempo de cómputo. Por su parte, el valor de z_{MPO} alcanzado es superior al de la estrategia RH, pero inferior al de la formulación original. Además, C^T de RH-iAC también es superior al alcanzado por RH, pero mejora en el apartado de INC_{MPO} casi en un 3%.

En la Figura 5.5 se comparan las 3 estrategias utilizadas para resolver el MPO. Aquí se observa, en términos generales, la bondad de las soluciones obtenidas con ambas estrategias de resolución propuestas con respecto a la correspondiente al modelo original. Ambas técnicas encuentran un valor inferior de la variable objetivo que el correspondiente a la formulación original. Dado que, si bien los costos totales incurridos son algo superiores, se respetan en mayor proporción los perfiles de venta proporcionados por el MPT. Finalmente, se logra una reducción sustancial del tiempo de resolución del problema.

Es necesario aclarar que únicamente es posible afirmar que los valores alcanzados de z_{MPO} mediante las estrategias de resolución propuestas son inferiores al correspondiente a la resolución del modelo original por el hecho de que durante la resolución

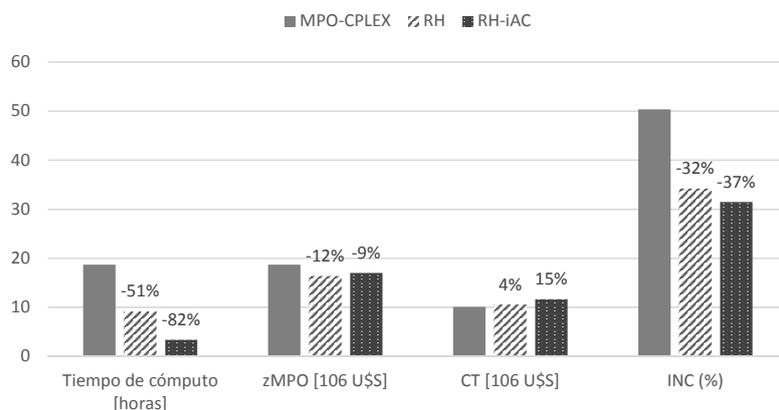


Figura 5.5 – Comparación de las variables analizadas para las 3 estrategias utilizadas. Por encima de las barras correspondiente a la serie RH y RH-iAC se presenta la variación porcentual de la variable en cuestión con respecto a la resolución del modelo original.

de este último, el proceso de optimización se vio interrumpido. De lo contrario, uno sostendría que ha encontrado una solución mejor a la óptima, lo que sería matemáticamente imposible y revelaría que no se está reportando una solución factible del problema original.

Hasta aquí llega la comparación entre las estrategias de resolución propuestas. Se puede afirmar que los enfoques propuestos del tipo rolling horizon con y sin restricciones adicionales relacionadas a la operatoria de las cámaras de AC, cumplen el propósito para lo que fueron desarrollados: obtener una solución adecuada en un tiempo de cómputo razonable.

Dada la ventaja en lo que respecta a tiempo de resolución de RH-iAC con respecto al resto de las opciones y la relativa bondad de su solución, los estudios subsiguientes serán desarrollados empleando esta estrategia.

5.4.3. Resolución MPO con RH-iAC. Función objetivo modificada mediante el factor de peso r

En esta sección se analizará el efecto que tiene sobre la solución la variación del valor del parámetro r en la función objetivo del problema (Ecuación 5.48). Se corrieron un total de 15 escenarios, cambiando arbitrariamente el valor de r desde 1 a 500 con el objetivo de aumentar paulatinamente el efecto negativo de no cumplir con los perfiles provistos por el MPT. Dado que a bajos valores de r la variabilidad de la solución fue mayor, se corrió una mayor cantidad de escenarios en un rango de valores cercanos a 1. La lista completa de valores de r considerados es: 1, 1.1, 1.2,

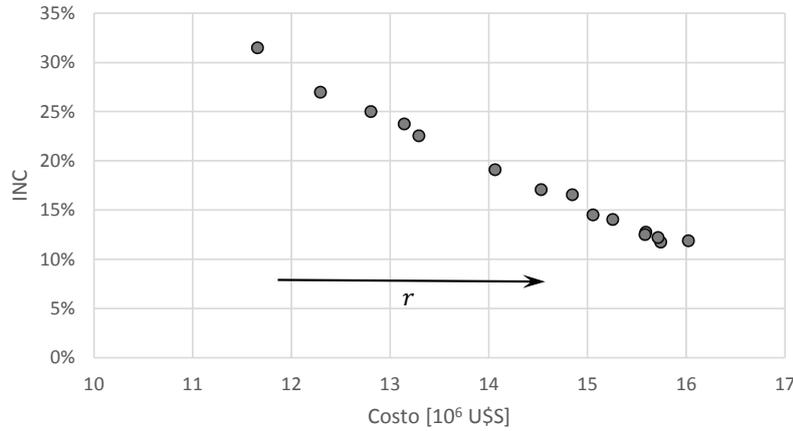


Figura 5.6 – Variación de los costos totales e incumplimiento de los perfiles de venta del MPT para diferentes valores de r .

1.3, 1.4, 1.5, 1.75, 2, 3, 4, 5, 10, 50, 100, 500. Es necesario señalar además que, como para cada uno de estos escenarios la función objetivo es modificada, no tiene sentido comparar entre ellos el valor de z_{MPO} alcanzado.

En la Figura 5.6 se muestra la relación de compromiso encontrada entre el costo total y la adecuación a los perfiles de ventas del MPT con la variación de r . Si bien no es posible decir que los valores reportados correspondan efectivamente a los valores óptimos para cada uno de los casos, se puede entrever que existe un efecto contrapuesto en los costos al tratar de disminuir el nivel de incumplimiento con respecto a lo propuesto por el MPT. Aumentar r implica buscar soluciones que se adapten mejor a los perfiles de venta. Para lograr esto, se incurre necesariamente en una mayor generación de costos.

A continuación desagregaremos la información presentada en la Figura 5.6 de forma tal de poder identificar el mecanismo por el cual la solución logra efectivamente adecuarse al plan de ventas del MPT y por qué aumentan los costos de la operatoria de la CS.

Adecuación a los perfiles de venta del MPT

En primer lugar, de los 15 escenarios considerados tomaremos 5 de ellos entre los cuales hay una variación aproximada de INC_{MPO} del 5%. Ellos son los correspondientes a $r = 1, 1.2, 1.5, 3$ y 500.

En la Figura 5.7 se presentan los distintos perfiles de venta propuesto para los valores de r considerados. Los valores reportados aquí no corresponden a los perfiles

diarios, sino a los perfiles expresados en términos de los períodos del horizonte del planeamiento táctico. Los mismos se calculan mediante el uso de la Ecuación 5.41. Por otra parte, dado que en la función objetivo se calcula el incumplimiento en términos monetarios, en la gráfica los perfiles son expresados en las mismas unidades para que sea consistente con ésta.

La Figura 5.7 muestra cómo efectivamente el MPO trata de cumplir en mayor medida con lo propuesto por el MPT a medida que r aumenta lo que se traduce gráficamente en menores áreas grises debajo de los perfiles de venta. Tanto en la Figura 5.7a como en la 5.7b los mayores niveles de incumplimiento se dan entre los períodos 12 y 18. En el otro extremo, en la Figura 5.7e, la mayor parte del perfil de ventas se satisface, observándose un pequeño incumplimiento entre los períodos 11 y 13, y 24 y 28, asociados a la porción del año en la que el abastecimiento de fruta al mercado se da exclusivamente a través de la fruta almacenada en las cámaras de AC.

Otro aspecto que vale la pena mencionar es que, si bien nada se ha dicho en la función objetivo con respecto a las desviaciones positivas, se confirma que minimizar los costos conduce implícitamente a no vender por encima de lo requerido por el MPT. No obstante, hay que señalar que al aumentar r , las desviaciones positivas totales también aumentan.

Este último punto es importante, y es atribuido en parte a que para lograr adecuarse con mayor precisión a lo dictado por el MPT, el MPO debe aumentar el volumen total de fruta procesada. Adicionalmente, se observa que las desviaciones positivas se dan en su mayoría en períodos tempranos del horizonte de planeamiento. Con el objeto de evitar incurrir en costos asociados al almacenamiento de la fruta en las cámaras frigoríficas.

En la Figura 5.8 se muestra la información presentada anteriormente, reorganizada en términos de los mercados de comercialización en lugar de a través del perfil temporal. Además, se ha agrupado para cada uno de los mercados considerados las ventas de las distintas variedades por especie, con el objeto de facilitar la lectura de los gráficos.

Si bien la Figura 5.8 no proporciona información adicional con respecto a la Figura 5.7 en términos de lo que ocurre a nivel general con el incumplimiento a medida que aumenta r , sí permite identificar cuáles son los mercados a los que el MPO decide seguir con preferencia. El orden de prioridad es establecido por el término correspondiente al precio en la función objetivo. De esta forma, aquellas ventas que estén asociadas a un precio mayor, tendrán un impacto proporcionalmente superior

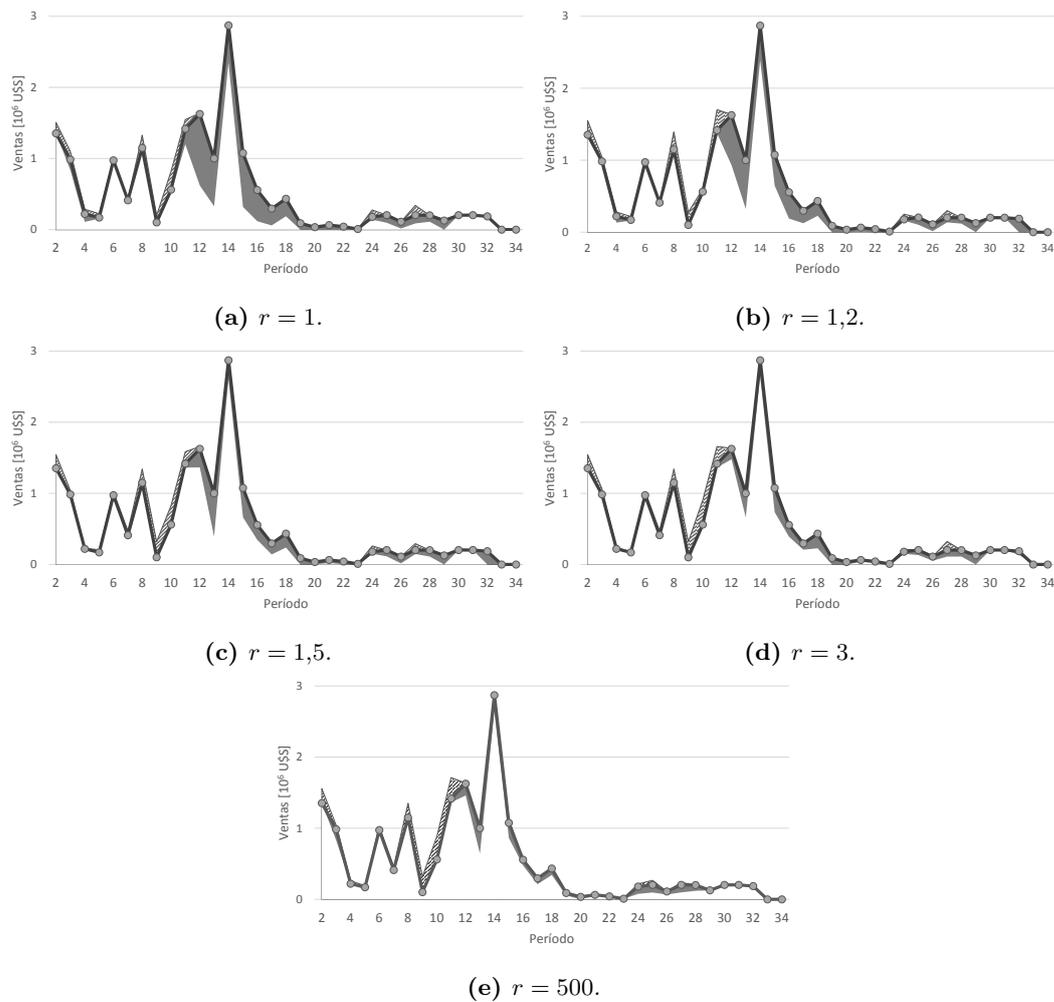


Figura 5.7 – Desviaciones temporales de las ventas expresadas en millones de U\$S del MPO con respecto a los perfiles provistos por el MPT para los valores de r seleccionados. La línea sólida corresponde al volumen de venta provisto por el MPT, el área gris representa las desviaciones negativas del MPO con respecto al MPT, mientras que el área rayada representa las desviaciones positivas obtenidas.

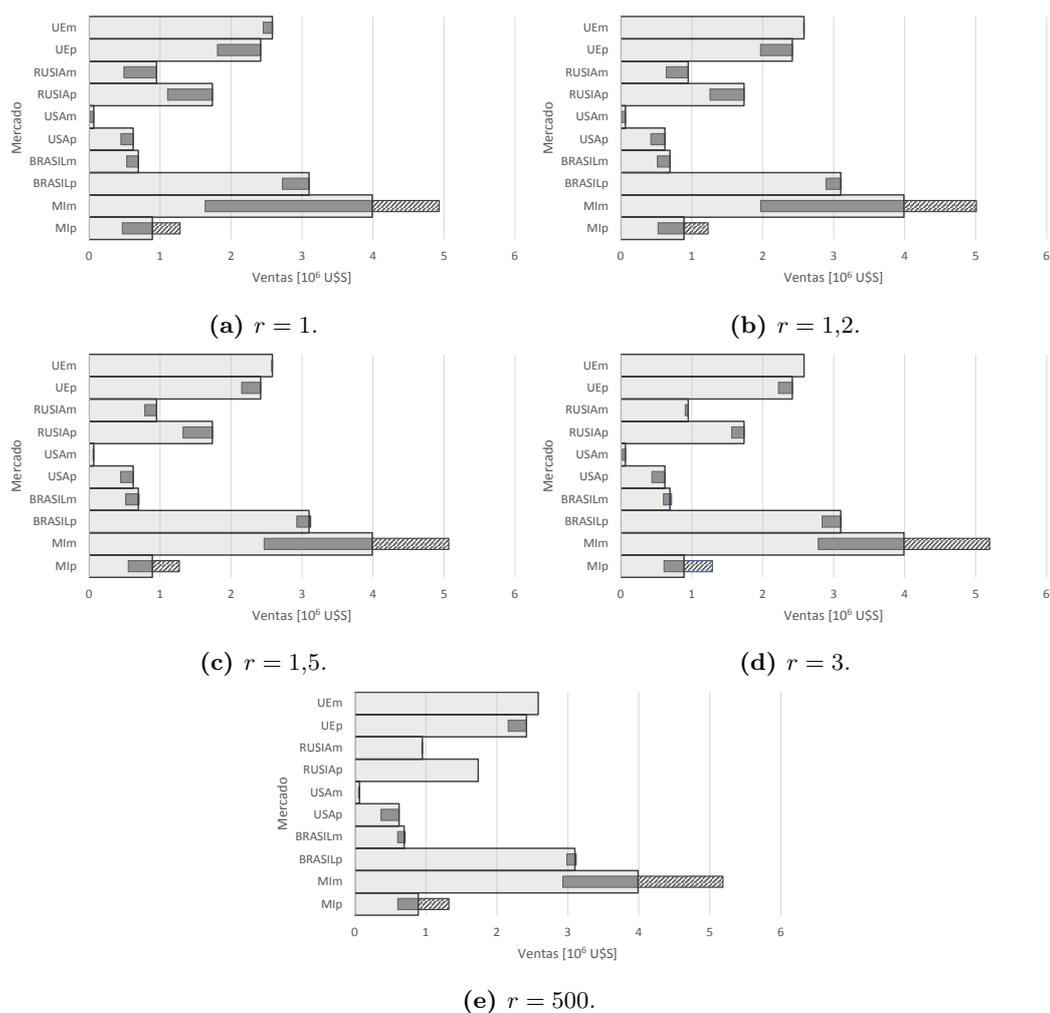


Figura 5.8 – Desviaciones por mercado de las ventas expresadas en millones de U\$S del MPO con respecto a los perfiles provistos por el MPT para los valores de r seleccionados. La barra gris clara corresponde al volumen de venta recomendado por el MPT, las barras gris oscuras representan las desviaciones negativas del MPO con respecto al MPT, mientras que las barras rayadas representa las desviaciones positivas obtenidas (m: manzanas, p: peras).

y la solución tratará de cumplirla con predilección. Este efecto se ve más claramente a valores bajos de r , ya que cuando r crece la diferencia entre los precios pierde influencia en la función objetivo. En la Figura 5.8a puede apreciarse como el MPO se ajusta relativamente bien principalmente a los perfiles relacionados a la UE y a Brasil. Por el contrario, gran parte de los perfiles asociados al MI no son cumplidos. Por su parte, aquellos mercados en los que los valores absolutos de las diferencias negativas son mayores, es donde se da la mejora más importante de INC_{MPO} con el aumento de r , tal es el caso de la manzana en MI.

Por otra parte, la Figura 5.8 aporta nueva información con relación a las diferencias positivas. En todos los casos las mismas se dan casi exclusivamente en el MI. Como dijimos anteriormente, para poder adecuarse mejor a los perfiles es necesario procesar una mayor cantidad de fruta. Adicionalmente, esto producirá un volumen de fruta que no será de la calidad mínima exigida por el mercado al que se busca abastecer. Este volumen extra procesado debe ser comercializado a través del único mercado que acepta todas las calidades de fruta fresca –el MI–. Por lo tanto, el resultado final del comportamiento de las desviaciones positivas conjuga dos efectos: (i) por un lado, el volumen extra procesado para ajustarse mejor a los perfiles se canaliza a través del MI; (ii) por otro, la solución propone desprenderse cuanto antes de esta fruta para evitar aumentar el nivel de costos asociados al almacenamiento de la misma.

Efectos económicos de la adecuación a los perfiles de venta del MPT

En esta sección analizaremos con más detalle los diferentes efectos que se producen en el apartado económico al aumentar el cumplimiento de los perfiles de venta provistos por el MPT mediante el aumento de r (Figura 5.6). La Figura 5.9 muestra una serie de gráficos en los que se analiza el comportamiento de algunas variables económicas con la variación del nivel de incumplimiento a los perfiles de venta proporcionados por el MPT. Para facilitar la lectura de los gráficos el eje horizontal se expresa en función de la inversa de la variable INC_{MPO} ($100 - INC_{MPO}$), representando el porcentaje total de los perfiles respetados por el MPO.

En primer lugar, en la Figura 5.9a se presenta la evolución de los costos y los ingresos totales, junto con el margen bruto expresado en porcentaje. Este último, calculado en la Ecuación 5.49, expresa el porcentaje de los ingresos totales que la empresa retiene luego de pagar por el costo de los bienes vendidos. Los primeros dos indicadores se leen sobre el eje izquierdo (líneas sólidas), mientras que el tercero se lee sobre el eje

derecho (línea de trazos).

$$MB(\%) = \frac{ING^T - C^T}{ING^T} \cdot 100 \quad (5.49)$$

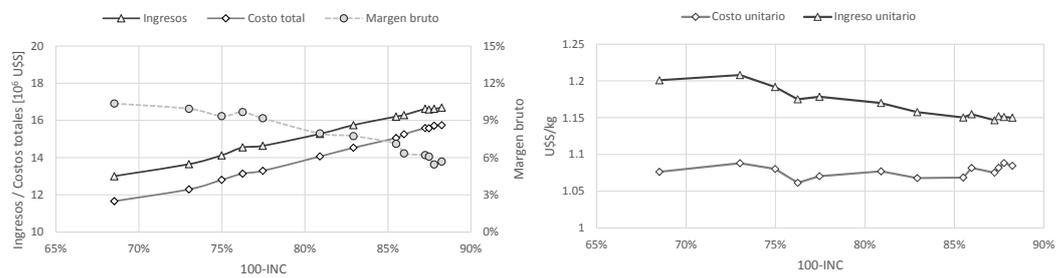
Seguidamente, en la Figura 5.9b se presenta la evolución tanto de los ingresos unitarios como de los costos unitarios. Los mismos son calculados realizando el cociente entre los ingresos totales y los costos totales, respectivamente, y el volumen total de venta expresado en kg.

Finalmente, en la Figura 5.9c se han disgregado los costos totales en varias componentes, alguna de las cuales, incluyen a su vez varios items. C-FP es el costo de producción de la fruta en la chacra (C_t^{pp}), C-F3 es el costo de adquisición de fruta fresca de terceros (C_t^{p3s}), C-S incluye todos aquellos costos que están directamente relacionados al volumen de venta (C_t^{pack} , C_t^{log}), C-MP es el costo de mano de obra en el galpón de empaque (C_t^{mp}), C-FC incluye los costos generados por la utilización de las cámaras de FC (C_t^{on} , C_t^{ch} , C_t^c y FC_t^c), C-AC los correspondientes a la operatoria de las cámaras de AC (C_t^a y FC_t^a) y C-Pto corresponde al costo generado por la utilización de las cámaras frigoríficas del puerto (C_t^{hc}).

La Figura 5.9a permite observar que el aumento de costos producido al mejorar el nivel de cumplimiento de los perfiles de venta va acompañado por un aumento en los ingresos totales generados por esas ventas. Sin embargo, la brecha existente entre ellos –el beneficio económico–, disminuye a medida que el MPO logra ajustar mejor a lo propuesto por el MPT. De esta forma sobre el final de la curva, el margen bruto, se ve reducido a casi la mitad de su valor inicial.

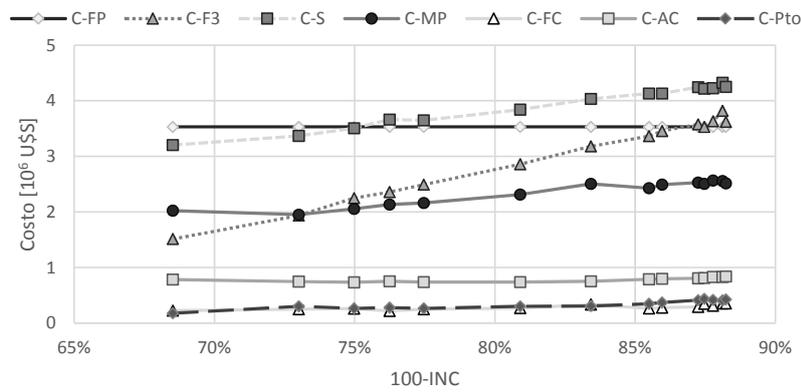
Por su parte, la Figura 5.9b da un claro indicio de las razones que llevan a la reducción de la diferencia entre los ingresos y los costos totales. Al realizar el cociente de ambos indicadores con el volumen total de ventas, se encuentra que si bien el costo de producir un kg de producto se mantiene relativamente constante, el ingreso promedio unitario percibido por la comercialización del producto disminuye conforme aumenta el nivel de cumplimiento de los perfiles de venta. Esto está directamente relacionado con la información presentada en la Figura 5.8, en la que se reporta que los mayores ajustes, tanto de las desviaciones negativas como positivas de los perfiles, se realizan en el MI, mercado caracterizado por tener los niveles de precios más bajos.

Por último, en la Figura 5.9c se identifican aquellas actividades que se ven más afectadas a la hora de ajustar los perfiles. En primer lugar se observa que, si bien el nivel de costo de producción de la fruta en las chacras alcanza un nivel importante



(a) Ingreso total, costo total y margen bruto.

(b) Ingreso y costo unitario.



(c) Costos totales por componentes.

Figura 5.9 – Evolución de variables económicas en función del nivel de cumplimiento de los perfiles de venta proporcionados por el MPT.

(C-FP en la Figura 5.9c) permanece constante, dado que no está relacionado con las ventas, sino con el volumen disponible para cosechar.

Posteriormente, como era de esperarse, aquellos costos cuyos montos se encuentran directamente relacionados al volumen de venta (C-S en la Figura 5.9c) aumentan con el cumplimiento ($100 - INC_{MPO}$) dado que el volumen de fruta comercializado necesariamente aumenta para ajustarse mejor a los perfiles.

Por su parte, el costo de adquisición de fruta fresca de terceros (C-F3 en la Figura 5.9c) es el que aumenta con mayor intensidad. El hecho de que el nivel de producción propia se encuentre fijo y no alcance a satisfacer la demanda, obliga a emplear fruta producida por otros. A medida que se intenta respetar en mayor medida lo propuesto por el MPT esta necesidad aumenta traduciéndose en un aumento del costo generado por esta actividad.

En lo que respecta al costo de mano de obra (C-MP en la Figura 5.9c) se observa que el mismo aumenta con el cumplimiento ($100 - INC_{MPO}$), pero lo hace a una tasa inferior que la curva correspondiente a C-S y C-F3. Como éste es un costo que se encuentra relacionado al nivel de producción pero no de forma directamente proporcional, el hecho de que no aumente a la misma velocidad que otras componentes del costo indica la posibilidad de realizar una utilización más eficiente de este recurso aumentando la cantidad de fruta procesada por turno contratado y asignando los turnos a los períodos adecuados.

Finalmente, los costos asociados al almacenamiento de la fruta (C-FC, C-AC y C-Pto en la Figura 5.9c) aumentan, pero a una tasa relativamente baja en relación al resto de las componentes que presentan variación con $100 - INC_{MPO}$.

Efecto del factor r en la operatoria de la CS

En esta sección estudiaremos los cambios operativos en la solución del MPO asociados a la adecuación a los perfiles del MPT en la operatoria de la CS. Dada la gran cantidad de información contenida en las soluciones del MPO, las variables principales han tenido que ser agrupadas para posibilitar su análisis.

En primer lugar, en la Figura 5.10 se presenta para 4 escenarios diferentes de r la variación del volumen de fruta total procesado diariamente. La línea sólida representa el total de fruta ingresado a las líneas de clasificación en un dado período, mientras que las líneas punteadas indican los límites mínimos y máximos establecidos por la cantidad de turnos de mano de obra contratada en dicho período. Por su parte,

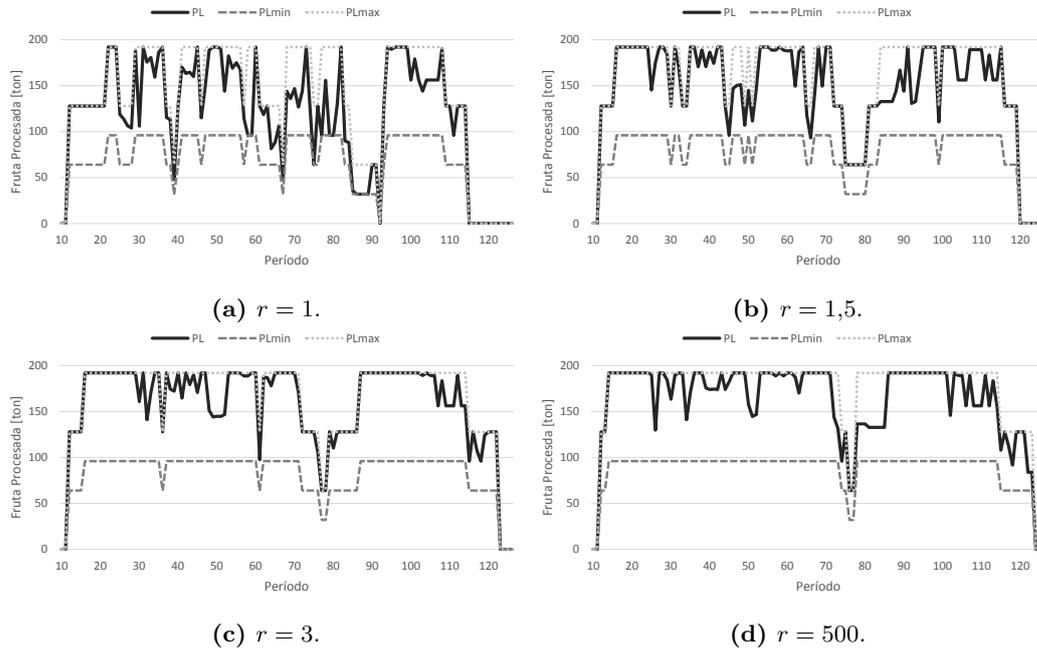


Figura 5.10 – Volumen diario de fruta procesada (PL), junto con las capacidades mínimas (PL_{min}) y máximas (PL_{max}) para cuatro escenarios de r .

la Figura 5.11 muestra para los mismos escenarios el porcentaje utilizado de la capacidad total contratada, junto con el porcentaje utilizado de la capacidad de procesamiento instalada. El primero se calcula realizando el cociente entre el volumen total de fruta procesada y la capacidad contratada total, resultante del producto entre la cantidad de turnos contratados y la capacidad máxima de procesamiento por turno (Ecuación 5.50). El segundo se calcula de forma similar, solo que aquí el denominador de la ecuación está conformado por la capacidad teórica máxima que el galpón de empaque tendría al trabajar toda la temporada con todos los turnos contratados a máxima capacidad (Ecuación 5.51).

$$\% \text{Capac. contratada} = \frac{\sum_{lvt} PL_{lvt}}{PL \cdot \sum_{st} Y_{st}^{tu}} \cdot 100 \quad (5.50)$$

$$\% \text{Capac. instalada} = \frac{\sum_{lvt} PL_{lvt}}{PL^T} \cdot 100 \quad (5.51)$$

La Figura 5.10 muestra que a medida que r aumenta, tanto la cota mínima como la máxima (las líneas punteadas de la gráfica) permanecen durante mayor cantidad de períodos en su límite superior, indicando que la cantidad de turnos contratados para trabajar en las líneas de clasificación también crece. Adicionalmente, se observa cómo el volumen de fruta total procesado (líneas sólidas de las figuras) se ve afectado en el mismo sentido.

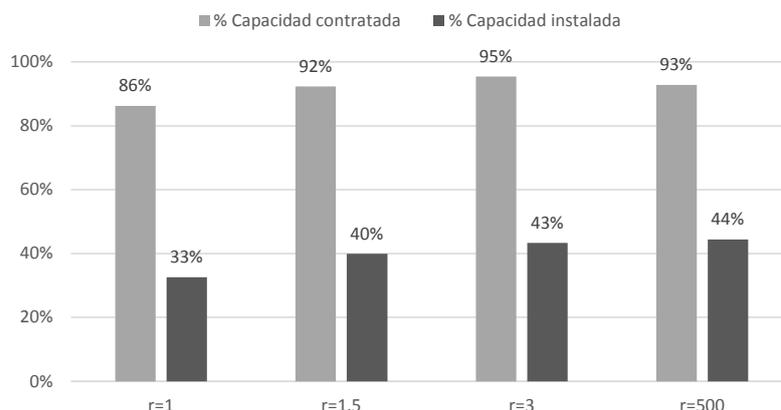


Figura 5.11 – Cambios en el porcentaje de utilización de la capacidad contratada, junto con la capacidad instalada.

La información de la Figura 5.11 se encuentra estrechamente relacionada con la anterior. Por un lado, cuanto mayor sea el porcentaje de utilización de la capacidad contratada mayor será el aprovechamiento de la mano de obra. De esta forma, para el caso de $r = 3$ se encuentra que este valor alcanza un máximo (95 %) y la línea sólida correspondiente al volumen de fruta procesada se encuentra sobre la línea punteada superior (PLmax) en la Figura 5.10c en una mayor proporción en relación al resto de los casos estudiados. Por otra parte, la mayor utilización de la capacidad instalada está directamente relacionada al volumen de fruta total procesado y es independiente de la cantidad de turnos contratados. En este caso, cuando r vale 500 se alcanza el máximo en este apartado (44 %). Vale la pena aclarar que los valores relativamente bajos que alcanza ese parámetro está relacionado a que se realiza el cociente sobre la longitud total del horizonte sobre la que se puede procesar fruta. En todos los escenarios analizados la solución propone procesar fruta únicamente por un período relativamente pequeño posterior a la finalización de la temporada.

A continuación, en la Figura 5.12 se presentan los perfiles de almacenamiento para los distintos tipos de frío considerados para los mismos 4 escenarios de r estudiados anteriormente.

En el caso de FC (Figura 5.12a), cuando r es igual a 1 el perfil se mantiene por debajo del resto de los casos durante todo el horizonte de planeamiento. Para los otros 3 escenarios se observa que en la primera parte del horizonte de planeamiento a bajos r el nivel de inventario es mayor, incluso alcanzando la capacidad máxima instalada en el caso de $r = 1,5$. Por el contrario, pasados los 100 días la tendencia se invierte y, para el caso de $r = 500$ las cámaras permanecen encendidas por más tiempo.

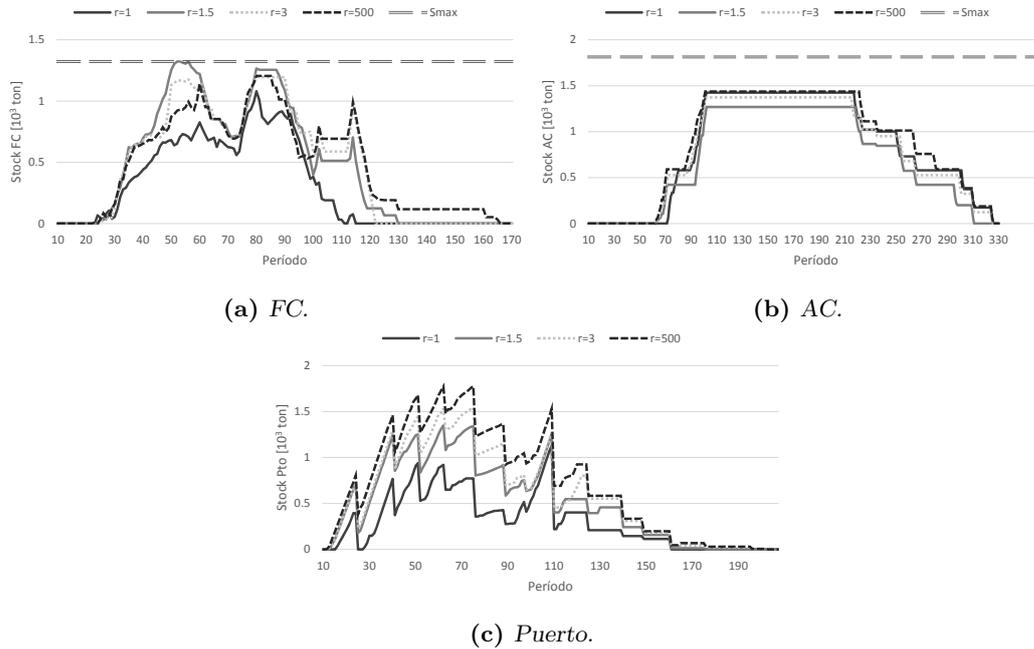


Figura 5.12 – Perfiles de inventario de fruta almacenada en las distintas posibilidades consideradas para diferentes escenarios de r .

Por su parte, los perfiles de stock en las cámaras de AC (Figura 5.12b) son muy similares, con diferencias básicamente en la cantidad de fruta guardada al momento de cerrar la cámara. Hay que recordar aquí que parte de la estrategia de resolución utilizada (RH-iAC) consiste en emplear información del MPT referida a la operatoria de estas cámaras, por lo que es de esperar que sus curvas se asemejen. Otro de los aspectos que es necesario mencionar es que en ninguno de los casos las cámaras se cierran ocupadas al máximo de su capacidad. A esto último se atribuye que en ninguno de los escenarios analizados se cumpla totalmente el perfil correspondiente a la última parte del año (Figura 5.7).

Finalmente, en la Figura 5.12c se observa una marcada tendencia a aumentar la utilización del recurso del frío del puerto cuando se busca cumplir en mayor medida los perfiles de venta (mayor r). Con este recurso, lógicamente los mercados beneficiados son únicamente los de ultramar. Además, las curvas permiten observar claramente la operatoria con este tipo de frío: cuando no hay barcos en el puerto, la fruta se almacena en las cámaras. En el momento en el que los buques arriban, la fruta almacenada en las cámaras es cargada inmediatamente y en consecuencia, el stock desciende de manera abrupta.

5.5. Conclusiones

En este capítulo se abordó el problema de planeamiento operativo de la CS de la fruta. Para esto, fue necesario desarrollar una estrategia de resolución que permitiera reducir los tiempos de cómputos correspondientes a la formulación original.

Adicionalmente, se comprobó que la utilización de información generada por un modelo de un estamento superior de la pirámide de decisiones, resultó decisiva para alcanzar las soluciones buscadas. El uso de esta información se efectivizó mediante dos vías diferentes: i) formulación de la función objetivo a optimizar penalizando el apartamiento con respecto a los perfiles de venta provistos por el MPT, los cuales fueron considerados óptimos en lo que respecta a satisfacción de demanda y maximización de beneficios económicos para una dada infraestructura de la CS; ii) incorporación de restricciones relacionadas a la operatoria de las cámaras de AC mediante la estrategia de resolución RH-iAC.

Las respuestas obtenidas con los métodos propuestos resultaron satisfactorias tanto desde la calidad de la solución como del tiempo de cómputo requerido. Con la estrategia RH se redujo a la mitad el tiempo de resolución, y la solución final hallada fue mejor a la encontrada por CPLEX con la formulación original en más de 18 horas de cómputo.

Por su parte, con la estrategia RH-iAC se resolvió la instancia del MPO en un tiempo sustancialmente menor a los requeridos por los otros intentos. A su vez, la solución encontrada resultó aceptable en relación a las anteriores. Si bien el costo total requerido para realizar las operaciones fue levemente superior, se ajustó mejor a los perfiles de venta proporcionados por el MPT. Por estas razones, los análisis posteriores se realizaron con el uso de esta estrategia.

Seguidamente, mediante el agregado de un factor de peso al término de incumplimiento de la función objetivo, se evaluó el efecto que produce en la solución una mayor adecuación a los perfiles de venta suministrados. De esta forma, se encontró una relación inversa entre el nivel de incumplimiento y el costo total generado para lograr dicho propósito.

Al analizar con cierta profundidad las soluciones encontradas, se corroboró que a pesar de no explicitar una penalidad a las desviaciones positivas con respecto a los perfiles, el hecho de minimizar los costos totales contribuye a que estas no se produzcan, salvo para evitar infactibilidades. Adicionalmente, se comprobó que al aumentar el factor de peso relacionado al término de ajuste de los perfiles de venta,

la solución efectivamente se asemeja en mayor medida a estos.

Al aumentar el valor del parámetro, el orden de importancia de los perfiles de venta establecido por los precios de venta disminuye su influencia. Adicionalmente, se encontró que las diferencias positivas a los perfiles se dan casi exclusivamente en el mercado interno, atribuible a que este mercado acepta todas las calidades de fruta.

En lo que respecta a los aspectos económicos, el hecho de ajustar mejor a los perfiles de venta produjo no sólo un aumento en los costos totales, sino también un aumento en los ingresos producidos por la venta de un mayor volumen de fruta. Sin embargo, la brecha existente entre estos dos indicadores disminuye con el aumento del ajuste. De esta forma, el margen bruto de rentabilidad obtenido entre el escenario inicial y final se ve reducido casi a la mitad.

Finalmente, se estudiaron los cambios desencadenados por el mejor ajuste a los perfiles de venta desde el punto de vista de la operatoria de la CS. Así se verificó que al aumentar el peso del ajuste a los perfiles del MPT, aumenta el uso de la capacidad instalada de las líneas de clasificación, así como también el aprovechamiento de los turnos contratados dado que los mismos trabajan durante una mayor proporción de su jornada a máxima capacidad.

En lo que se refiere a la utilización de los recursos de almacenamiento disponibles, se encontró una mayor tendencia a almacenar fruta en las cámaras de FC en la última porción de su horizonte de operación con el aumento del valor del parámetro. Por su parte, se encontró que la operatoria de las cámaras de AC es similar en todos los casos, diferenciadas básicamente en la cantidad de fruta almacenada dentro de ellas. Por último, la utilización de las cámaras en el puerto aumentó con el valor del parámetro para abastecer en mayor medida a los mercados de ultramar.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

En esta tesis se ha abordado el planeamiento óptimo en la industria de la fruta de pepita. Como se describió con algún detalle en el Capítulo 2 para el sistema productivo-industrial de peras y manzanas localizado en la región del Alto Valle de Río Negro y Neuquén y se ha intentado demostrar en los capítulos subsiguientes, la toma de decisiones en esta actividad presenta desafíos importantes, producto fundamentalmente de una significativa incertidumbre tanto en el segmento de producción primaria como en el de comercialización de los productos finales a los diferentes mercados. La naturaleza multi-producto y estacional de la actividad junto con la condición perecedera de sus artículos aumentan la complejidad del problema.

Específicamente se han estudiado los tres niveles de toma de decisión principales de cualquier cadena de suministro: estratégico, táctico y operativo. A nivel estratégico (Capítulo 3), entre los distintos problemas posibles se seleccionó el estudio del recambio de variedades, relacionado con la introducción de nuevos ítems a la cartera de productos de una empresa. Por una parte la reestructuración varietal es de importancia estratégica porque las inversiones realizadas, tanto para remover plantaciones existentes como para instalar nuevas, son en general cuantiosas y porque los periodos de entrada en producción de la nuevas plantaciones comprenden varios años, aun para las modalidades de reconversión más eficientes. Por otra parte, en el complejo productivo estudiado, la presencia de grandes plantaciones de ciertas variedades que en los últimos años han encontrado cada vez más dificultades para insertarse en el mercado internacional ha impactado negativamente en el negocio, tornando necesario el desarrollo de herramientas que permitan sistematizar este tipo de análisis por parte tanto de grandes productores como de planificadores gubernamentales.

En lo que respecta a los niveles de planeamiento táctico y operativo, se modeló la cadena de suministro desde la producción en chacra hasta los mercados finales, pasando por el galpón de empaque y las cámaras frigoríficas, con el objeto de planificar los principales flujos e inventarios del sistema a lo largo de la temporada.

A nivel táctico (Capítulo 4) el horizonte de planeamiento anual se subdividió en 34 periodos delimitados por fechas significativas de la actividad frutícola. Este modelo permite, sobre la base de pronósticos de cosecha, costos y precios, definir los programas de ventas que optimicen el beneficio del negocio y decidir, entre otras cosas, sobre el cierre y apertura de las cámaras de atmósfera controlada disponibles. Asimismo posibilita el estudio del impacto producido sobre la operatoria de la cadena de suministro por modificaciones en infraestructura, en particular número y tipo de cámaras frigoríficas. Se entiende que este modelo tiene un rol en el análisis del sistema antes de iniciarse la temporada, de manera de disponer de un panorama que permita establecer acuerdos con potenciales clientes así como con prestadores de servicios, como por ejemplo logística de transporte y frío. Un posible usuario de la herramienta es un gerente de negocios de un galpón de empaque con participación en el segmento productivo del sector.

A nivel operativo (Capítulo 5), un modelo similar al anterior pero con una discretización diaria del horizonte de planeamiento se planteó en el marco una estrategia “rolling horizon”, que por una parte posibilita una reducción considerable del tiempo de cómputo y por otro permite incorporar información actualizada del sistema a medida que se dispone, en particular volúmenes y calidades de fruta cosechada, precios y costos y posibles episodios disruptivos del funcionamiento del proceso (salida de funcionamiento de líneas de clasificación, reducciones de capacidad de transporte, etc.). Este modelo tiene un rol en la administración diaria del sistema y podría ser consultado varias veces por semana por un gerente técnico de la empresa interesado en el impacto de corto plazo de decisiones operativas.

Cabe recordar que a diferencia de otras cadenas de suministro, la cadena de suministro de la fruta está impulsada por la producción más que por la demanda, dado que independientemente de las posibles ventas, se da una inevitable producción de una enorme cantidad de productos que es necesario colocar en cada temporada. Esta circunstancia hace que no se pueda modelar la demanda de productos finales como órdenes de compra específicas en determinados periodos del horizonte de planeamiento que “tiren” del sistema hasta la instancia de provisión de materias primas, sino que impone un tratamiento basado en perfiles de referencia a los cuales es ne-

cesario aproximarse en la medida que la disponibilidad de fruta lo permite. Por la situación indicada, el sector comercial de esta industria es de difícil representación dado que muchas de las ventas que tienen lugar, tanto en mercado como en volumen y precio, se van estableciendo en la medida que el sistema genera necesariamente sub-productos para cumplir con compromisos definidos.

En todos los casos se procuró representar lo más fielmente posible la operatoria del sistema nacional radicado en la zona del Alto Valle de Río Negro y Neuquén. Para ello se realizaron múltiples entrevistas con distintos operadores del sistema que proporcionaron información que intentó incluirse en los estudios realizados, además de consultarse numerosos documentos elaborados anualmente por analistas del sector. Cabe aclarar que la parte comercial, además de poseer las características arriba descriptas, varía significativamente de empresa a empresa complicando aún más la posibilidad de lograr una representación concluyente de su gestión. En este sentido, el enfoque desarrollado en esta tesis se considera una primera aproximación al problema de planeamiento óptimo del sector, cuya representación definitiva se logre posiblemente en el marco de un proyecto de transferencia con una empresa particular para la cual sea posible modelar con suficiente nivel de detalle una operatoria comercial específica.

Cabe mencionarse que desde el punto de vista de la transferencia consideramos que existe un enorme potencial dado que a pesar de la gran tecnificación que ha experimentado el sector en los últimos años, la toma de decisiones, tanto a nivel privado como estatal, continúa siendo altamente artesanal.

Desde un punto de vista más académico, como trabajo futuro a desarrollar entendemos existen posibilidades en todos los niveles de planeamiento. Una cuestión inmediata, inherente a todos los modelos propuestos en esta tesis, es la incorporación de modelos de estimación de precios de venta de los diferentes productos. Esta tarea es sumamente desafiante debido a que los precios están determinados por un lado por la oferta internacional, que a su vez depende de las plantaciones existentes, así como del tiempo (clima) en las regiones productoras, y por otra por la preferencia de los consumidores en los diferentes mercados. Dado que a menudo resulta difícil estimar los precios para la próxima temporada, y aún más los de un periodo de varios años, esta tarea es desarrollada cada año por expertos del sector.

Otra cuestión que puede motivar un estudio ulterior es la resolución de los problemas de recambio varietal y de planeamiento táctico de la cadena de suministro considerando explícitamente la incertidumbre en los parámetros más importantes del

modelo. En particular, para el problema de recambio varietal los precios de las distintas variedades son los parámetros que mayor incertidumbre presentan sobre todo tratándose de predicciones de varias décadas a partir del momento actual. Aunque importantes, para el modelo de planeamiento táctico los precios son de menor relevancia (por tratarse los correspondientes únicamente a la próxima temporada) frente, por ejemplo a los perfiles de demanda y de producción en chacra de las diferentes variedades.

La implementación de este tipo de modelos con incertidumbre supone necesariamente formulaciones que demandan en general capacidades de cómputo importantes, ya se adopte una estrategia basada en la discretización del espacio de parámetros inciertos en un esquema orientado a ecuaciones o una basada en simulación-optimización con muestreo del espacio incierto. En ambos casos el desafío radica en lograr soluciones en tiempos prácticos con los equipos de cómputo disponibles.

Apéndice A

Formulación matemática modelo planeamiento estratégico

En este apéndice se presenta la formulación detallada del modelo utilizado para el desarrollo del Capítulo 3. Toda la información necesaria suministrada al modelo se reporta en el Apéndice B, mientras que la nomenclatura utilizada se encuentra en el Apéndice C.

A.1. Balances de superficie

El modelo está planteado para cada período t en términos de área ocupada por plantaciones de variedad j , densidad s y edad e en cada cuadro i (S_{isje}^o). El área disponible para nuevas plantaciones es denotado por S_{it}^d (Figura A.1).

El primer término del lado derecho de la Ecuación A.1 representa el estado inicial de la chacra (S_{isje}^0 , presentado en la Tabla 3.1), el cual solamente se tiene en cuenta si se está calculando el área ocupada en el primer período del horizonte de planeamiento. El segundo término ($S_{isje-1t-1}^o$) corresponde al área ocupada en el período anterior. En el tercer término se sustrae el área removida de una plantación (S_{isjet}^r). El cuarto término corresponde al área talada (S_{ijet}^{tal}). Como la reconversión vía reinjertación sólo se puede llevar a cabo en plantaciones jóvenes de alta densidad, la superficie involucrada debe cumplir con estas restricciones ($s = A, 8 \leq e \leq 15$). En el quinto término se contabiliza la superficie reinjertada (S_{ijt}^{rein}). Para lograr representar una entrada en producción más temprana, se le asigna una edad igual a 2 cuando la reconversión es por esta vía. Nuevamente es necesario exigir que se trate de una

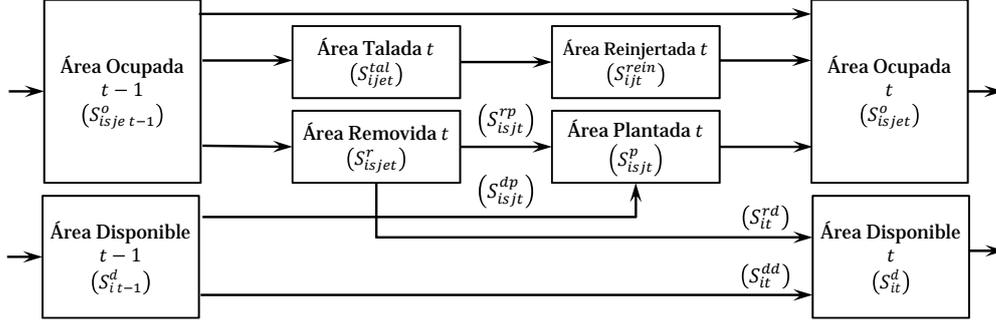


Figura A.1 – Esquema de balances de superficie. Los bloques exteriores caracterizan la estructura de la chacra en los períodos t y $t - 1$. Los bloques intermedios representan las actividades consideradas. Las flechas conectan las posibilidades permitidas. Entre paréntesis se incluye la variable del modelo asociada al bloque o flecha correspondiente. Hay una variable asociada a una flecha solo cuando esta proviene de un bloque que tiene más de una flecha de salida.

plantación de alta densidad. Finalmente, el sexto término le asigna una edad 0 a la superficie plantada.

La Ecuación A.2 establece que todas las plantaciones que alcanzan su máxima vida útil (35 años) son removidas automáticamente.

$$S_{isjet}^o = S_{isje}^0 \Big|_{e>0}^{t=1} + S_{isje-1t-1}^o \Big|_{e>1}^{t>1} - S_{isjet}^r \Big|_{e>0} - S_{ijet}^{tal} \Big|_{\substack{s=A \\ 8 \leq e \leq 15}} + S_{ijt}^{rein} \Big|_{\substack{s=A \\ e=2}} + S_{isjt}^p \Big|_{e=0} \quad \forall i, s, j, e, t \quad (\text{A.1})$$

$$S_{isjet}^o = 0 \quad \forall i, j, s, t, e \geq 35 \quad (\text{A.2})$$

Las Ecuaciones A.3 y A.4 representan los balances de superficie talada y reinjertada en cada cuadro i en cada período t . Dado que solo es posible injertar una manzana en un pie de manzana, y una pera en un pie de pera, los balances de área talada y reinjertada son llevados a cabo en forma separada para manzanas (Ecuación A.3, $a_j \in J$) y peras (Ecuación A.4, $p_j \in J$). Si una plantación es talada en el período t (S_{ijet}^{tal}), la reinjertación (S_{ijt}^{rein}) debe realizarse en el mismo período (Figura A.1).

$$\sum_{a_j \in J} S_{ia_jt}^{rein} = \sum_{\substack{a_j \in J \\ 8 \leq e \leq 15}} S_{ia_jt}^{tal} \quad \forall i, t \quad (\text{A.3})$$

$$\sum_{p_j \in J} S_{ip_jt}^{rein} = \sum_{\substack{p_j \in J \\ 8 \leq e \leq 15}} S_{ip_jt}^{tal} \quad \forall i, t \quad (\text{A.4})$$

La Ecuación A.5 establece que las plantaciones que no cumplen las condiciones

necesarias para reinjertación no pueden ser taladas.

$$S_{ijet}^{tal} = 0 \quad \forall i, j, t, (e < 8 \vee e > 15) \quad (\text{A.5})$$

La Ecuación A.6 es utilizada para cuantificar el destino del área disponible en cada cuadro i (S_{it-1}^d). Puede Permanecer como tal (S_{it}^{dd}) o ser utilizada para nuevas plantaciones (S_{isjt}^{dp}) (Figura A.1).

$$S_{it}^{dd} + \sum_{sj} S_{isjt}^{dp} = S_{it-1}^d \quad \forall i, t > 1 \quad (\text{A.6})$$

La Ecuación A.7 calcula el área disponible del cuadro i en el período t (S_{it}^d) como la suma del área que permanece disponible del período previo (S_{it}^{dd}) y la resultante de la remoción de plantaciones en el período actual (S_{it}^{rd}) (Figura A.1).

$$S_{it}^d = S_{it}^{dd} + S_{it}^{rd} \quad \forall i, t \quad (\text{A.7})$$

La Ecuación A.8 indica que la superficie plantada de la variedad j , densidad s del cuadro i (S_{isjt}^p) es igual a la suma del área removida que es utilizada para nuevas plantaciones (S_{isjt}^{rp}) más el área disponible del período previo que ha sido utilizada para nuevas plantaciones (S_{isjt}^{dp}) (Figura A.1).

$$S_{isjt}^p = S_{isjt}^{rp} + S_{isjt}^{dp} \quad \forall i, s, j, t \quad (\text{A.8})$$

La Ecuación A.9 provee los posibles destinos del área total removida en cada cuadro i en el año t (S_{isjet}^r). Puede ser utilizada para nuevas plantaciones (S_{isjt}^{rp}) o bien permanecer disponible (S_{it}^{rd}) (Figura A.1).

$$\sum_{sje} S_{isjet}^r = \sum_{sj} S_{isjt}^{rp} + S_{it}^{rd} \quad \forall i, t \quad (\text{A.9})$$

Si las especies removida e incorporada son diferentes (pera/ manzana, manzana/ pera), la remoción y plantado puede ocurrir en el mismo período. Las Ecuaciones A.10 y A.11 fuerzan este comportamiento. La Ecuación A.10 asegura que el área total removida de manzanas en un cuadro i en el período t (S_{isajet}^r) debe ser mayor o igual a la suma del área removida que es asignada para plantar peras en el mismo período (S_{ispjt}^{rp}). La Ecuación A.11 hace lo mismo con las peras.

$$\sum_{\substack{se \\ a_j \in J}} S_{isajet}^r \geq \sum_{\substack{s \\ p_j \in J}} S_{ispjt}^{rp} \quad \forall i, t \quad (\text{A.10})$$

$$\sum_{\substack{se \\ p_j \in J}} S_{ispjt}^{rp} \geq \sum_{\substack{s \\ a_j \in J}} S_{isajet}^r \quad \forall i, t \quad (\text{A.11})$$

En la Ecuación A.12 se realiza un balance total de área para cada cuadro, igualando la suma del área ocupada y la que permanece disponible al tamaño del lote (S_i^c , presentado en la Tabla 3.1).

$$S_{it}^d + \sum_{sje} S_{isjet}^o = S_i^c \quad \forall i, t \quad (\text{A.12})$$

Para evitar la remoción y plantación de superficies muy pequeñas, se agregan restricciones con variables binarias (Y_{isjet}^{So} y Y_{it}^{Sd}), forzando que el área ocupada y disponible caigan dentro de un rango definido por un valor mínimo (\underline{S}^o) y el tamaño del cuadro (S_i^c) o 0.

$$\underline{S}^o \cdot Y_{isjet}^{So} \leq S_{isjet}^o \leq S_i^c \cdot Y_{isjet}^{So} \quad \forall i, s, j, e, t \quad (\text{A.13})$$

$$\underline{S}^o \cdot Y_{it}^{Sd} \leq S_{it}^d \leq S_i^c \cdot Y_{it}^{Sd} \quad \forall i, t \quad (\text{A.14})$$

A.2. Niveles de producción

En esta sección se calculan los niveles de producción anual obtenidos de la estructura de variedades presentes en la chacra a lo largo del horizonte de planeamiento. Estas variables son luego utilizadas en el cálculo de los ingresos y egresos de dinero en los balances económicos.

En la Ecuación A.15 la producción anual por variedad y densidad de plantación ($P_{s jt}^{js}$) es calculada como el producto entre el área ocupada por una dada plantación (S_{isjet}^o) por su productividad (B_{sje}). Como mencionamos oportunamente, este parámetro depende de la densidad s , de la variedad j y de la edad e (los datos de entrada en producción por densidad y el nivel máximo por variedad se presentan en el Apéndice B en la página 155).

$$P_{s jt}^{js} = \sum_{ie} (B_{sje} \cdot S_{isjet}^o) \quad \forall s, j, t \quad (\text{A.15})$$

La Ecuación A.16 calcula la producción anual por variedad (P_{jt}^j) integrando las producciones obtenidas por las plantaciones de dicha variedad instaladas con diferentes densidades ($P_{s jt}^{js}$).

$$P_{jt}^j = \sum_s P_{s jt}^{js} \quad \forall j, t \quad (\text{A.16})$$

A.3. Control de cosecha

El control de cosecha es impuesto a partir de un dado período del horizonte de planeamiento definido por el usuario (T^{CC} , página 156 del Apéndice B). El modelo permite un lapso de adaptación de T^{CC} años en caso de que la estructura inicial de la chacra no esté balanceada en términos de volumen recolectado por semana durante el período de cosecha y se requieran varios años para alcanzar el balance deseado. Por otra parte, dado que cada variedad de fruta es recolectada dentro de un período de cosecha característico, se ha definido un calendario de cosecha (CC_{jw} , Tabla B.5), el cual establece las semanas del año en las que cada variedad es recolectada. El período total de recolección de fruta se distribuye en un horizonte de 15 semanas en cada año.

La Ecuación A.17 establece que la producción anual de cada variedad (P_{jt}^j , calculada en la Ecuación A.16) debe ser recolectada en las semanas en las que dicha variedad es recolectada (P_{wjt}^w).

$$P_{jt}^j = \sum_w P_{wjt}^w \quad \forall j, T^{CC} \leq t \leq T \quad (\text{A.17})$$

Por otra parte, la cantidad de fruta de la variedad j recolectada en la semana w (P_{wjt}^w) será 0 si la semana w no está incluida en el calendario de cosecha de la variedad j (Ecuación A.18).

$$P_{wjt}^w = 0 \quad \forall (w, j) \notin CC_{jw}, T^{CC} \leq t \leq T \quad (\text{A.18})$$

La Ecuación A.19 calcula el volumen semanal de fruta recolectada en cada w del período t (Q_{wt}^w) sumando las productividades semanales de todas las variedades recolectadas en esa semana (P_{wjt}^w).

$$Q_{wt}^w = \sum_j P_{wjt}^w \quad \forall w, T^{CC} \leq t \leq T \quad (\text{A.19})$$

La producción semanal durante el período de cosecha está limitada por la capacidad máxima que puede ser manipulada con los recursos disponibles, como lo establece la Ecuación A.20. Por otro lado, la Ecuación A.21 impone un nivel mínimo de recolección semanal durante el período de cosecha. Estos niveles mínimos y máximos permitidos son los modificados para realizar el análisis de sensibilidad de la disponibilidad de mano de obra (Sección 3.4.2 del Capítulo 3, los valores utilizados para el caso base se presentan en la página 156 del Apéndice B).

$$Q_{wt}^w \leq \bar{Q} \quad \forall w, T^{CC} \leq t \leq T \quad (\text{A.20})$$

$$Q_{wt}^w \geq \underline{Q} \quad \forall w, T^{CC} \leq t \leq T \quad (\text{A.21})$$

Por su parte, la variación entre semanas de la fruta recolectada también está limitada por las Ecuaciones A.22 y A.23. El cambio está restringido a una fracción ($\overline{\Delta Q}$, página 156 del Apéndice B) de la fruta recolectada la semana previa.

$$Q_{wt}^w \leq Q_{wt-1}^w \cdot (1 + \overline{\Delta Q}) \quad w > 1, T^{CC} \leq t \leq T \quad (\text{A.22})$$

$$Q_{wt}^w \geq Q_{wt-1}^w \cdot (1 - \overline{\Delta Q}) \quad w > 1, T^{CC} \leq t \leq T \quad (\text{A.23})$$

A.4. Balances económicos

El valor presente neto (VPN) es calculado en la Ecuación A.24 como la suma de los flujos anuales descontados a lo largo del horizonte de planeamiento, usando la tasa de descuento (rd , en la página 156 del Apéndice B), menos el presupuesto inicial ($Budget_0$, página 156 del Apéndice B).

$$VPN = -Budget_0 + \sum_t \frac{CF_t}{(1 + rd)^t} \quad (\text{A.24})$$

El flujo de dinero anual (CF_t) es calculado en la Ecuación A.25 considerando los ingresos netos después de impuestos (NE_t), el costo anual de inversión ($FTDC_t$), la cantidad de dinero obtenida por financiamiento (C_t) y el pago de deuda de capital ($Pcpal_t^{pay}$). El cálculo del flujo de dinero en el último período del horizonte de planeamiento debe también considerar el valor de continuidad (SV), como se puede ver en la Ecuación A.26.

$$CF_t = NE_t + -FTDC_t + C_t - Pcpal_t^{pay} \quad \forall t \neq T \quad (\text{A.25})$$

$$CF_t = NE_t - FTDC_t + C_t - Pcpal_t^{pay} + SV \quad t = T \quad (\text{A.26})$$

Los ingresos netos después de impuestos (NE_t) son calculados en la Ecuación A.27 como la diferencia entre los ingresos por la venta de fruta (ING_t) y los egresos deducibles de impuestos: OFC_t (costos fijos operativos), OC_t (gastos generales), VC_t (costos variables), RC_t (costos de remoción de plantaciones), I_t (intereses pagados por la toma de un crédito); corregidos por la tasa de impuestos considerada (rt , en página 156 del Apéndice B).

$$NE_t = (1 - rt) \cdot (ING_t - OFC_t - OC_t - VC_t - RC_t - I_t) + rt \cdot D_t \quad \forall t \quad (\text{A.27})$$

Los diferentes términos de las Ecuaciones A.25, A.26 y A.27 son definidos a continuación. La Ecuación A.28 provee el ingreso anual por venta de fruta en el período

t como la suma del producto entre el precio estimado de venta de cada variedad j en cada mercado m (ϕ_{mjt} , Tabla B.2), su participación en cada mercado (A_{mj} , Tabla B.2) y la productividad anual de la variedad (P_{jt}^j). El costo fijo operativo (OFC_t) es calculado en la Ecuación A.29 como la suma de los productos entre el costo fijo operativo por hectárea (fc_{sjt} , Tabla B.3) y el área ocupada correspondiente (S_{isjet}^o). Los gastos generales (OC_t) son calculados en la Ecuación A.30. Los mismos son función exclusivamente del tamaño del establecimiento, consecuentemente se calculan utilizando el concepto de economía de escala (los valores de los parámetros se presentan en el Apéndice B en la página 155). Si bien no se puede tomar ninguna decisión que modifique el valor de esta componente, debe ser considerado dado que se realiza un control del presupuesto anual. Los costos variables (VC_t) son calculados en la Ecuación A.31 como la suma del producto entre el costo variable por kg (vc_{sjt} , Tabla B.3) y la producción (P_{sjt}^{js}). En la Ecuación A.32 se calcula el costo asociado a la remoción de plantaciones (RC_t) como en producto entre el costo de remoción por hectárea (rc , en la página 156 del Apéndice B) y el área removida en dicho período (S_{isjet}^r).

$$ING_t = \sum_{mj} \left(A_{mj} \cdot \phi_{mjt} \cdot P_{jt}^j \right) \quad \forall t \quad (\text{A.28})$$

$$OFC_t = \sum_{isje} \left(fc_{sjt} \cdot S_{isjet}^o \right) \quad \forall t \quad (\text{A.29})$$

$$OC_t = oc_1 \cdot \left(\sum_i S_i^c \right)^{oc_2} \quad (\text{A.30})$$

$$VC_t = \sum_{sj} \left(vc_{sjt} \cdot P_{sjt}^{js} \right) \quad \forall t \quad (\text{A.31})$$

$$RC_t = \sum_{isje} \left(rc \cdot S_{isjet}^r \right) \quad \forall t \quad (\text{A.32})$$

Los costos de inversión anual ($FTDC_t$) son calculados en la Ecuación A.33 considerando ambos métodos de reconversión: plantaciones nuevas (IC_t) y reinjertación (GC_t).

$$FTDC_t = IC_t + GC_t \quad \forall t \quad (\text{A.33})$$

El cálculo de inversiones en nuevas plantaciones tiene una estructura compleja, dado que para poder instalar una nueva plantación, se deben llevar a cabo una serie de actividades sobre un período de varios años (implantación, laboreo del suelo, fertilización, instalación de defensa contra heladas, etc.), cada cual tiene asociado costos diferentes. En el caso de las manzanas, la extensión del período de inversión es de 3 años, mientras que para el caso de las peras es de 4. Dado que los períodos de

inversión para ambas especies es diferente, los costos asociados deben ser calculados en forma independiente.

La Ecuación A.34 provee el costo de inversión en nuevas plantaciones (IC_t). Para poder identificar la etapa de inversión, fueron definidos dos subsets de e : e^{ia} para las manzanas y e^{ip} para las peras. e^{ia} contiene los tres primeros elementos de e mientras que e^{ip} contiene los primeros cuatro. De esta forma, puede ser identificado si hay un área ocupada con plantaciones de esta edad en el cuál la inversión aún no ha sido completada ($S_{isa_j e^{ia} t}^o$ o $S_{isp_j e^{ip} t}^o$) y tiene un costo asociado ($ic_{se^{ia}}^{a_j}$ o $ic_{se^{ip}}^{p_j}$, Tabla B.4). Para evitar que el área reinjertada (S_{ijt}^{rein}), la cual tiene un tratamiento diferente, sea incluida en el cálculo, es restada cuando corresponde.

$$IC_t = \sum_{\substack{is \\ a_j \in J \\ e^{ia} \in e}} ic_{se^{ia}}^{a_j} \cdot \left(S_{isa_j e^{ia} t}^o - S_{ia_j t}^{rein} \right) + \sum_{\substack{is \\ p_j \in J \\ e^{ip} \in e}} ic_{se^{ip}}^{p_j} \cdot \left(S_{isp_j e^{ip} t}^o - S_{ip_j t}^{rein} \right) \quad \forall t \quad (\text{A.34})$$

En la Ecuación A.35 el costo de reinjertación es calculado como la suma del producto entre el costo de reinjertación por hectárea ($cg_{r^a}^{a_j}$ o $cg_{r^p}^{p_j}$, Tabla B.4) y el área reinjertada correspondiente. Como en el caso de inversión en nuevas plantaciones, los períodos de inversión de ambas especies (peras y manzanas) son diferentes (r^a y r^p) y por lo tanto se calculan en forma separada.

$$GC_t = \sum_{\substack{i \\ a_j \in J \\ r^a}} \left(cg_{r^a}^{a_j} \cdot S_{ia_j t - r^a + 1}^{rein} \right) + \sum_{\substack{i \\ p_j \in J \\ r^p}} \left(cg_{r^p}^{p_j} \cdot S_{ip_j t - r^p + 1}^{rein} \right) \quad \forall t \quad (\text{A.35})$$

La depreciación de las plantaciones es calculado el método de línea recta (Blank y Tarquin, 2002), considerando que se comienzan a depreciar una vez que la inversión ha finalizado. La Ecuación A.36 calcula la depreciación anual (D_t) como el producto entre el factor anual de depreciación ($\frac{1-sv}{T^{value}}$, donde $(1-sv)$ representa la fracción de las plantaciones que se deprecia, mientras que T^{value} es la vida útil de las mismas, página 156 del Apéndice B), la suma de las plantaciones que están sujetas a depreciación y el costo total de inversión.

$$D_t = \frac{1-sv}{T^{value}} \cdot \left(\left(\sum_{e^{ia} \in e} ic_{se^{ia}}^{a_j} \right) \cdot \sum_{\substack{i \\ a_j \in J \\ 3 \leq e \leq 23}} S_{isa_j e t}^o + \left(\sum_{e^{ip} \in e} ic_{se^{ip}}^{p_j} \right) \cdot \sum_{\substack{i \\ p_j \in J \\ 4 \leq e \leq 24}} S_{isp_j e t}^o \right) \quad \forall t \quad (\text{A.36})$$

La Ecuación A.37 calcula el valor de continuidad (SV), el cual considera los ingresos que la estructura final de la chacra generarían hasta que todas las plantaciones alcancen su máxima vida útil. El flujo de dinero considerado aquí (CF_t^*) es calculado de la misma forma que aquellos generados durante el horizonte de planeamiento (Ecuación A.25).

$$SV = \sum_t \frac{CF_t^*}{(1+rd)^{T+t}} \quad (A.37)$$

A.5. Financiamiento

Se ha considerado que el dueño/gerente de la chacra tiene acceso a financiamiento externo para realizar inversiones de reestructuración. En el caso de pedir dinero, la cantidad de dinero conseguido (C_t) debe estar dentro de un cierto rango ($\underline{Cred}, \overline{Cred}$, ambos en la página 156 del Apéndice B). Esto ha sido modelado en la Ecuación A.38 con el auxilio de las variables binarias (Y_t^C) que toman el valor 1 si se ha pedido un préstamo en el tiempo t , y 0 si no.

$$\underline{Cred} \cdot Y_t^C \leq C_t \leq \overline{Cred} \cdot Y_t^C \quad \forall t \quad (A.38)$$

El modelo propuesto considera el sistema de repago Francés, en el cuál el crédito se paga en cuotas de igual monto (Blank y Tarquin, 2002). El valor del pago en el período t se calcula con la Ecuación A.39, la cual considera la anualización de la deuda utilizando la tasa de interés del crédito (i_{cred} , página 156 del Apéndice B) y el plazo con el que se cuenta para saldar la deuda (*plazo*).

$$TotalPay_t = \sum_{t' \leq t} \frac{(C_{t'} - PaidDebt_{t'}) \cdot i_{cred}}{1 - \frac{1}{(1+i_{cred})^{plazo}}} \quad \forall t \quad (A.39)$$

El pago realizado en el período t ($TotalPay_t$) comprende el pago del principal ($Pcpal_t^{pay}$) y los intereses generados por la deuda (I_t) (Ecuación A.40).

$$TotalPay_t = Pcpal_t^{pay} + I_t \quad \forall t \quad (A.40)$$

La cantidad de intereses pagados en t (I_t) es calculada en la Ecuación A.41 como el producto entre la tasa de interés del préstamo (i_{cred}) y la deuda de capital en dicho período ($Pcpal_t^{debt}$).

$$I_t = i_{cred} \cdot Pcpal_t^{debt} \quad \forall t \quad (A.41)$$

La deuda de capital en el período t ($Pcpal_t^{debt}$) está dada en la Ecuación A.42 como la deuda de capital en el período previo $t-1$ más los préstamos pedidos en el período

actual (C_t) menos el pago de capital del período previo ($Pcpal_{t-1}^{pay}$).

$$Pcpal_t^{pay} = C_t + Pcpal_{t-1}^{debt} - Pcpal_{t-1}^{pay} \quad \forall t \quad (\text{A.42})$$

En la Ecuación A.43 se calcula el valor de la variable $PaidDebt_t$ en t , la cual tiene el valor del crédito pedido $plazo$ años antes ($C_{t-plazo}$). Esta variable es utilizada en la Ecuación A.39 para reflejar las deudas que ya han sido saldadas hasta el período t .

$$PaidDebt_t = C_{t-plazo} \quad \forall t > plazo \quad (\text{A.43})$$

A.6. Control de presupuesto

En la Ecuación A.44 se calcula el presupuesto anual ($Budget_t$) como el presupuesto en el período anterior $t - 1$ ($Budget_{t-1}$) más el flujo de dinero del período actual (CF_t).

$$Budget_t = Budget_{t-1} + CF_t \quad \forall t \quad (\text{A.44})$$

Se considera que existe un presupuesto inicial disponible, el cual es complementado con financiación externa tomada a lo largo del horizonte de planeamiento. Este presupuesto inicial es el que ha sido sometido al análisis de sensibilidad de la Sección 3.4.2 del Capítulo 3. El esquema de control de presupuesto básicamente considera que el egreso de dinero en el período t (EGR_t) debe ser menor o igual al presupuesto del período anterior ($Budget_{t-1}$) más la cantidad de dinero que se pidió prestada (C_t) (Ecuación A.45).

$$EGR_t \leq Budget_{t-1} + C_t \quad \forall t \quad (\text{A.45})$$

El egreso anual de dinero se calcula en la Ecuación A.46 y considera todas las variables del modelo relacionadas con desembolso de dinero.

$$EGR_t = OFC_t + OC_t + VC_t + RC_t + FTDC_t + TotalPay_t \quad \forall t \quad (\text{A.46})$$

A.7. Densidad de plantación promedio

Se definió un parámetro post solve para poder capturar las tendencias propuestas por el modelo en lo que respecta a densidad de plantación. La densidad promedio anual ($\bar{\rho}_t$) es obtenida del cociente entre el número de plantas presentes en un dado

período y el área total de la chacra (Ecuación A.47). Cada densidad de plantación considerada tiene un valor característico asociado (ρ_s), a saber:

Baja densidad: 200 plantas/ha.

Media densidad: 625 plantas/ha.

Alta densidad: 1250 plantas/ha.

$$\bar{\rho}_t = \frac{\sum_{isje} (S_{isjet}^o \cdot \rho_s)}{\sum_i S_i^c} \quad \forall t \quad (\text{A.47})$$

Apéndice B

Modelo planeamiento estratégico - Datos del caso de estudio

Los precios de venta y la distribución de los mercados por variedad son presentados en la Tabla B.2. Considerando la dificultad de predecir precios de venta y costos, sin perder generalidad, se asumieron valores constantes a lo largo del horizonte de planeamiento (20 años). Los costos fijos operativos y los costos variables se muestran en la Tabla B.3. Finalmente, los costos de inversión para ambos métodos de reconversión, pueden encontrarse en la Tabla B.4. Los valores utilizados para calcular los gastos generales en función del tamaño de la chacra fueron obtenidos de una regresión potencial sobre los datos presentados en [Leskovar y otros \(2010\)](#). sus valores son: $oc_1 = 1550$ y $oc_2 = 0,65$. En caso de estar disponibles, sería posible utilizar cualquier otro perfil de precios y costos. La pérdida de valor del dinero con el tiempo es tenida en cuenta a través de la tasa de descuento considerada.

La Tabla B.5 presenta el calendario de cosecha considerado, indicando las semanas en la cual cada variedad de fruta debe ser recolectada.

Los años de entrada en producción son discriminados por especie y densidad de plantación. Para plantaciones de manzana son: 4, 3 y 2 para baja, media y alta densidad, respectivamente. Para plantaciones de pera son: 5, 4 y 3 para baja, media y alta densidad, respectivamente. Los niveles máximos de producción alcanzados por variedad son (ton/ha): Gala, 42; Granny Smith, 55; Cripps Pink, 50; Red Delicious, 40; Abate Fetel, 40; Beurre Danjou, 55; Packams Triumph, 45; Red Bartlet, 40;

Tabla B.1 – Definición de los sets.

Set	Descripción	Número de elementos
i	Cuadros	5
j	Variedades	9
s	Densidad de plantación	3
a_j	Variedades de manzana	4
p_j	Variedades de pera	5
e	Edad de las plantaciones	35
t	Períodos del horizonte de planeamiento	20
w	Semanas de cosechas	15
m	Mercados de comercialización	3

Tabla B.2 – Precios de venta. ϕ_{mjt} (U\$/kg)/Participación del mercado. A_{mj} (%).

Variedad	Mercados de comercialización		
	Exportación	Interno	industria
Williams	0.28/65	0.09/20	0.10/15
Red Bartlet	0.32/73	0.10/9	0.10/18
Beurre Danjou	0.32/70	0.07/1	0.10/29
Abate Fetel	1.27/72	0.10/5	0.10/23
Packams Triumph	0.39/58	0.13/19	0.10/23
Gala	0.31/57	0.11/25	0.12/18
Red Delicious	0.35/20	0.17/50	0.12/30
Granny Smith	0.36/22	0.15/26	0.12/52
Cripps Pink	0.98/75	0.16/5	0.12/20

Williams, 50.

Los parámetros restantes necesarios para definir el caso de estudio son listados a continuación: \bar{Q} , 150 (ton/semana); Q , 120 (ton/semana); $\bar{\Delta Q}$, 18 (%); T^{CC} , 10 (año); \underline{S}^o , 0.5 (ha); $Budget_0$, 500.000 (U\$); rc , 250 (U\$/ha); rt , 35 (%); rd , 15 (%); sv , 15 (%); \underline{Cred} , 25.000 (U\$); \overline{Cred} , 250.000 (U\$); i_{cred} , 20 (%); T^{value} , 20 (año).

Tabla B.3 – Costos fijos operativos. fc_{sjt} (U\$/kg) y Costos variables. vc_{sjt} (10^{-1} U\$/kg) (Leskovar y otros, 2010).

Densidad	fc_{sjt}		vc_{sjt}	
	Manzana	Pera	Manzana	Pera
Baja	6350	6400	0.605	0.605
Media	5400	5500	0.578	0.578
Alta	4900	5300	0.578	0.578

Tabla B.4 – Costos de inversión (10^3 U\$/ha) (Villarreal y otros, 2008; Rodriguez y otros, 2009).

Vía	Densidad	Manzana ($ic_{seia}^{aj}, cg_{ra}^{aj}$)			Pera ($ic_{seip}^{pj}, cg_{rp}^{pj}$)			
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Plantación	Baja	8.05	3.05	8.05	7.20	2.44	6.59	3.17
	Media	8.80	3.17	8.80	7.80	2.68	7.07	3.41
	Alta	9.76	3.66	9.76	8.78	2.93	8.05	3.90
Reinjertación	Alta	2.49	3.66	9.76	2.49	2.93	8.05	3.90

Tabla B.5 – Calendario de cosecha (CC_{jw}).

Variedad	Semanas de cosecha														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
W	✕	✕	✕												
RB		✕	✕	✕											
BD			✕	✕	✕										
AF				✕	✕	✕									
PT					✕	✕	✕								
G			✕	✕	✕										
RD						✕	✕	✕	✕						
GS									✕	✕	✕	✕			
CP												✕	✕	✕	✕

Apéndice C

Modelo planeamiento estratégico - Nomenclatura

Sets

i	Cuadros de la chacra
s	Densidades de plantación
j	Variedades de fruta
e	Edad de la plantación
t	Períodos en años
w	Semanas de cosecha
m	Mercados de comercialización
a_j	Subset de j , variedades de manzana
p_j	Subset de j , variedades de pera
e^{ia}	Subset de e , período de inversión de manzanas
e^{ip}	Subset de e , período de inversión de peras
r^a	Período de reinjertación de manzanas
r^p	Período de reinjertación de peras
t'	Períodos más allá del horizonte de planeamiento

Parámetros

S_{isje}^0	Estructura inicial de la chacra
S_i^c	Área del cuadro i (ha)
S^o	Superficie ocupada mínima
B_{sje}	Productividad de la variedad j con edad e y densidad s (ton/año)
T^{CC}	Año en el que se activa el control de cosecha
CC_{jw}	Calendario de cosecha
\bar{Q}	Capacidad máxima de recolección semanal (ton/semana)

\underline{Q}	Capacidad mínima de recolección semanal (ton/semana)
$\frac{\Delta Q}{Q}$	Variación porcentual máxima permitida entre semanas
$Budget_0$	Presupuesto inicial (U\$\$)
rd	Tasa de descuento
rt	Tasa de impuestos
ϕ_{mjt}	Proyección del precio de la variedad j en el mercado m en el período t (U\$\$/kg)
A_{mj}	Fracción de la variedad j enviada al mercado m
fc_{sjt}	Costo fijo operativo de la variable j con densidad s (U\$\$/ha)
oc_1	Factor pre-exponencial de los gastos generales
oc_2	Factor exponencial de los gastos generales
vc_{sjt}	Costos variables para plantaciones de la variedad j con densidad s (U\$\$/kg)
rc	Costo de remoción (U\$\$/ha)
ic_{seia}^{aj}	Costo de inversión de plantaciones de manzanas con densidad s (U\$\$/ha)
ic_{seip}^{pj}	Costo de inversión de plantaciones de peras con densidad s (U\$\$/ha)
cg_{ra}^{aj}	Costo de reinjertación de plantaciones de manzanas (U\$\$/ha)
cg_{rp}^{pj}	Costo de reinjertación de plantaciones de peras (U\$\$/ha)
sv	Factor del valor de continuidad
$Tvalue$	Vida útil de la plantación, utilizada para el cálculo de la depreciación (años)
$Cred$	Monto mínimo del crédito
\overline{Cred}	Monto máximo del crédito
i_{cred}	Tasa del crédito
$plazo$	Período de repago del crédito
ρ_s	Cantidad de plantas por hectárea para las diferentes densidades consideradas
$\overline{\rho_t}$	Densidad de plantación promedio anual

Variables continuas

S_{isjet}^o	Área del cuadro i ocupada por la variedad j con densidad s y edad e en el período t (ha)
S_{it}^d	Área disponible en el cuadro i en el período t (ha)
S_{isjt}^{dp}	Área disponible del cuadro i utilizada para plantar la variedad j con densidad s en el período t (ha)
S_{it}^{dd}	Área disponible del cuadro i que permanece disponible en t
S_{isjet}^r	Área del cuadro i , variedad j , densidad s y edad e que es removida en el período t (ha)
S_{isjt}^{rp}	Área del cuadro i que se vuelve disponible en el período t después de remover las plantaciones y es utilizada para plantar la variedad j con densidad s (ha)

S_{it}^{rd}	Área del cuadro i a la cual se le remueven las plantaciones y permanece disponible en el período t (ha)
S_{isjt}^p	Área del cuadro i en la cual la variedad j es plantada con densidad s en el período t (ha)
S_{ijet}^{tal}	Área del cuadro i , variedad j y edad e que es talada en el período t (ha)
S_{ijt}^{rein}	Área del cuadro i en el cual la variedad j es reinjertada en el período t (ha)
P_{sjt}^{js}	Producción obtenida de la variedad j con plantaciones de densidad s en el período t (ton)
P_{jt}^j	Producción anual de la variedad j en t (ton)
P_{wjt}^w	Producción de la variedad j en la semana w del período t (ton)
Q_{wt}^w	Cantidad de fruta recolectada en la semana w del período t (ton)
Q_{wt}^v	Variación permitida de volumen recolectada entre semanas sucesivas $w - 1$ y w en el período t (ton)
VPN	Valor presente neto (U\$S)
CF_t	Flujo neto de dinero en el período t (U\$S)
NE_t	Ingresos netos después de impuestos (U\$S)
$FTDC_t$	Fracción del capital total despreciable (U\$S)
C_t	Créditos solicitados en el período t (U\$S)
$Pcpal_t^{pay}$	Pago de capital en el período t (U\$S)
SV	Valor de continuidad del proyecto (U\$S)
ING_t	Ingresos en el período t (U\$S)
OFC_t	Costos fijos operativos totales en el año t (U\$S)
OC_t	Gastos generales en el período t (U\$S)
VC_t	Costos variables anuales en el período t (U\$S)
RC_t	Costo total de remoción de plantaciones en el período t (U\$S)
I_t	Intereses pagados en el período t (U\$S)
D_t	Depreciación total de las plantaciones en el período t (U\$S)
IC_t	Costo total de inversión en nuevas plantaciones en t (U\$S)
GC_t	Costo total de inversión por reinjertación en t (U\$S)
CF_t^*	Flujo de dinero generado por la estructura final más allá del horizonte de planeamiento (U\$S), utilizado en el cálculo del valor de continuidad del proyecto
$TotalPay_t$	Monto total pagado en créditos en el período t (U\$S)
$PaidDebt_t$	Monto de la deuda cancelada en el período t (U\$S)
$Pcpal_t^{debt}$	Deuda de capital en el período t (U\$S)
$Budget_t$	Presupuesto anual en el período t (U\$S)
EGR_t	Egreso anual de dinero en el período t (U\$S)

Variables binarias

Y_{it}^{Sd}	1 si hay superficie disponible en el cuadro i en el período t , 0 de otra forma
Y_{isjet}^{So}	1 si hay superficie ocupadas en el cuadro i con plantaciones de la variedad j con densidad s , edad e en el período t , 0 de otra forma
Y_t^C	1 si se solicitan préstamos en el período t , 0 de otra forma

Apéndice D

Formulación matemática modelo de planeamiento táctico de la cadena de suministro de la fruta

A continuación se describe en detalle las ecuaciones que conforman el modelo de planeamiento táctico de la cadena de suministro de la fruta descrito en el Capítulo 4. En la Figura D.1 se incluye el esquema de la CS de la fruta, junto con las variables asociadas al MPT para facilitar la comprensión del mismo.

Dado que tanto el MPT como el MPO han sido construidos sobre la misma base, muchas de las ecuaciones presentadas aquí son válidas para ambos modelos cambiando únicamente el índice correspondiente al período de planeamiento (p y t , respectivamente). Para identificar aquellas ecuaciones, la letra que identifica el período del planeamiento táctico (p) ha sido remplazada por la letra griega τ . De esta forma cuando en una ecuación aparezca τ en el lugar correspondiente al período de planeamiento, debe ser remplazada por p en el MPT o por t en el MPO.

D.1. Obtención de Materia Prima

La fruta fresca puede provenir tanto de chacras propias como de terceros. De la fruta proveniente de las chacras propias surge una corriente de descarte que se envía directamente a la industria para la elaboración de jugos sin pasar por el sector de clasificación.

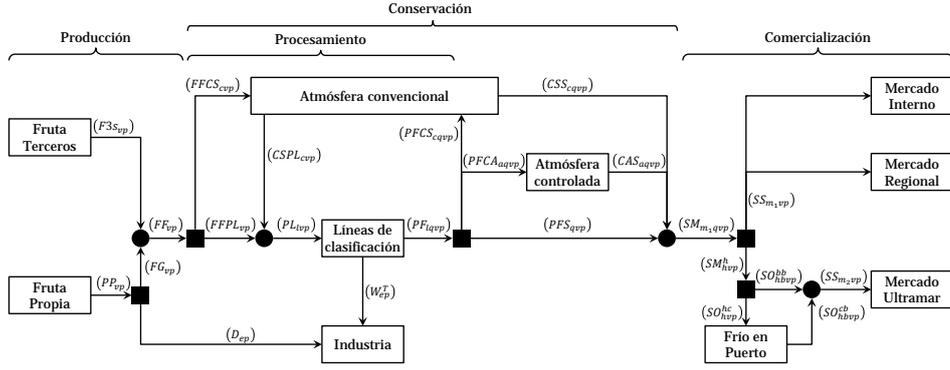


Figura D.1 – Esquema de la CS de la fruta junto con las variables del MPT asociadas.

Para estimar las cantidades de producción de fruta propia ($PP_{v\tau}$) y el porcentaje de descarte generado en chacra ($w_{v\tau}^{PP}$), se emplean muestras obtenidas a partir de valores medios y desviaciones estándar de cada uno de los parámetros (Ecuaciones D.1 y D.2, Tabla E.1).

Debido a que cada variedad es recolectada en un período de tiempo característico ($HP_{v\tau}$), definido en función del día de comienzo y final de su cosecha (Tabla E.1) los parámetros solamente son definidos para dicho período. Adicionalmente, en cada semana del período de cosecha de cada variedad, se recolecta un determinado porcentaje de la producción total de la variedad (DC_{vw} en la Tabla E.3). Por medio del uso de las Ecuaciones E.4 y E.5 se expresa en las unidades correspondientes al MPO y MPT, respectivamente.

$$PP_{v\tau} = DC_{v\tau} \cdot normal(\overline{PP}_v, \sigma_{PP_v}) \quad \forall(v, \tau) \in HP_{v\tau} \quad (D.1)$$

$$w_{v\tau}^{PP} = normal(\overline{w}_v^{PP}, \sigma_{w_v^{PP}}) \quad \forall(v, \tau) \in HP_{v\tau} \quad (D.2)$$

La cantidad de fruta que no puede ser enviada a empaque ($PI_{v\tau}$) queda definida por el producto entre la producción propia y el factor de descarte en chacra.

$$PI_{v\tau} = w_{v\tau}^{PP} \cdot PP_{v\tau} \quad \forall(v, \tau) \in HP_{v\tau} \quad (D.3)$$

El remanente ($PG_{v\tau}$) queda disponible para ser enviado a las líneas de empaque.

$$PG_{v\tau} = PP_{v\tau} - PI_{v\tau} \quad \forall(v, \tau) \in HP_{v\tau} \quad (D.4)$$

De todos modos, se puede decidir enviar a industria más fruta de la que surge por descarte ($FI_{v\tau}$) si resultara conveniente para la ecuación económica.

$$PG_{v\tau} = FG_{v\tau} + FI_{v\tau} \quad \forall(v, \tau) \in HP_{v\tau} \quad (D.5)$$

El total de fruta enviado a las líneas de empaque ($FF_{v\tau}$) es la suma de la fruta propia ($FG_{v\tau}$) más la fruta fresca comprada a terceros ($F3s_{v\tau}$).

$$FF_{v\tau} = FG_{v\tau} + F3s_{v\tau} \quad \forall (v, \tau) \in HP_{v\tau} \quad (\text{D.6})$$

Se considera que la fruta fresca disponible de terceros proveedores se encuentra entre valores acotados. Es por esto que la variable $F3s_{v\tau}$ se declara como una variable semi-continua y puede valer 0, o estar entre sus cotas. Se consideró que había una amplia disponibilidad de fruta de terceros de forma tal de evitar que ésta se vuelva un cuello de botella en las soluciones, por su parte para la cota mínima se consideró un volumen de 10 toneladas.

$$\underline{F3s_{v\tau}} \leq F3s_{v\tau} \leq \overline{F3s_{v\tau}} \quad \forall (v, \tau) \in HP_{v\tau} \quad (\text{D.7})$$

La fruta total enviada a industria directamente de la chacra ($D_{e\tau}$) es el descarte propiamente dicho más lo que se decide no enviar a la línea de empaque. El mismo se calcula por especie, mediante el uso del parámetro EV_{ev} que relaciona las distintas variedades consideradas según se traten de variedades de manzana (e_1) o de pera (e_2).

$$D_{e\tau} = \sum_{v \in (EV_{ev} \wedge HP_{v\tau})} (PI_{v\tau} + FI_{v\tau}) \quad \forall (e, \tau) \in HP'_{e\tau} \quad (\text{D.8})$$

D.2. Líneas de clasificación de fruta fresca

Como se comentó en la Sección 4.2 del Capítulo 4 la fruta fresca que ingresa al sector de clasificación puede ser enviada directamente a las líneas de clasificación ($FFPL_{v\tau}$) o ser almacenada en frío convencional para su posterior procesamiento ($FFCS_{cv\tau}$).

$$FF_{v\tau} = \sum_c FFCS_{cv\tau} + FFPL_{v\tau} \quad \forall (v, \tau) \in HP_{v\tau} \quad (\text{D.9})$$

La cantidad de fruta fresca que puede ser recibida por día está limitada por una capacidad máxima diaria (\overline{FF}_{τ} , Tabla E.5). Es necesario multiplicar este parámetro por la longitud del período de planeamiento táctico correspondiente para obtener el límite correcto.

$$\sum_{v \in HP_{v\tau}} FF_{v\tau} \leq \overline{FF}_{\tau} \quad \forall \tau \in HP''_{\tau} \quad (\text{D.10})$$

La fruta procesada en las líneas de clasificación ($PL_{lv\tau}$) es la suma de la fruta proveniente de las chacras y de las cámaras de frío convencional ($CSPL_{cv\tau}$) (ver Figura D.1).

$$\sum_l PL_{lv\tau} = FFPL_{lv\tau} \Big|_{HP_{v\tau}} + \sum_c CSPL_{cv\tau} \quad \forall (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.11)$$

Con el uso de la variable binaria $Y_{lv\tau}^{pl}$ se formula la restricción que establece que sólo es posible trabajar una variedad por día en cada línea. Como en este caso no es posible restringir a 1 la cantidad de variedades diarias, dado que cada período del horizonte de planeamiento está compuesto por varios días, el límite máximo de cantidad de variedades a procesar en el período táctico es la longitud del mismo (L_p , calculado en función del día de inicio y finalización correspondiente, Tabla E.2). Esta ecuación en el MPO tiene un tratamiento diferente.

$$\sum_{v \in HCS_{vp}} Y_{lv\tau}^{pl} \leq L_p \quad \forall p \in HCS''_p \quad (D.12)$$

Con una restricción del tipo *BigM* se termina de modelar la situación planteada anteriormente. Donde M es un parámetro con un valor suficientemente grande para relajar la cota máxima de $PL_{lv\tau}$ en caso de que $Y_{lv\tau}^{pl}$ tome el valor 1.

$$PL_{lv\tau} \leq Y_{lv\tau}^{pl} \cdot M \quad \forall (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.13)$$

En caso que se decida que una variedad sea procesada, como mínimo se debe procesar la capacidad mínima por turno \underline{PL} (Tabla E.5).

$$PL_{lv\tau} \geq Y_{lv\tau}^{pl} \cdot \underline{PL} \quad \forall l, (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.14)$$

La capacidad de procesamiento en las líneas de clasificación queda definida por la cantidad de turnos contratados ($\sum_s Y_{s\tau}^{tu}$) y la capacidad máxima de procesamiento instalada (\overline{PL} , Tabla E.5).

$$\sum_{v \in HCS_{v\tau}} PL_{lv\tau} \leq \sum_s Y_{s\tau}^{tu} \cdot \overline{PL} \quad \forall l, \tau \in HCS''_{\tau} \quad (D.15)$$

$$\sum_{v \in HCS_{v\tau}} PL_{lv\tau} \geq \sum_s Y_{s\tau}^{tu} \cdot \underline{PL} \quad \forall l, \tau \in HCS''_{\tau} \quad (D.16)$$

Se ha considerado el hecho de que en caso de contratarse un turno ($Y_{s\tau}^{tu} = 1$), se le debe asegurar un plazo mínimo de trabajo (J). La Ecuación D.17 surge de desarrollar la siguiente proposición lógica que describe la situación mencionada anteriormente.

$$(\neg Y_{s\tau-1}^{tu} \wedge Y_{s\tau}^{tu}) \Rightarrow (Y_{s\tau+1}^{tu} \wedge Y_{s\tau+2}^{tu} \wedge \dots \wedge Y_{s\tau+J-1}^{tu})$$

$$Y_{s\tau-1}^{tu} \Big|_{\tau>1} - Y_{s\tau}^{tu} + Y_{s\tau+j-1}^{tu} \Big|_{\tau \leq P-J+1} \geq 0 \quad \forall s, j, \tau > HCS''_{\tau} \quad (D.17)$$

En el MPT no es posible controlar que se cumplan estrictamente 15 días de contratación dado que los períodos no son uniformes. Por esta razón, el plazo mínimo de contratación ha sido aproximado aquí a 2 períodos de planeamiento táctico ($J = 2$). Esto sí puede ser respetado en el MPO debido a la discretización diaria del mismo.

Mediante el proceso de clasificación la fruta es discriminada en términos de calidad y empacada ($PF_{lqv\tau}$). La distribución de calidad de cada una de las variedades ($q_{qv\tau}$) se presenta en la Tabla E.4, sus valores han sido definidos gracias a información provista por agentes del sector. Cabe mencionar que los mismos pueden variar de temporada a temporada. Durante este proceso se genera también una segunda corriente de descarte de fruta ($WPL_{lv\tau}$), la cual no cumple los requerimientos mínimos para ser comercializada como fruta fresca. El valor del parámetro de descarte ($w_{v\tau}$) también es provisto al modelo (Tabla E.4). Al igual que el descarte de la chacra, el descarte generado en las líneas de clasificación se destina a la industria (producción de jugos).

$$PL_{lv\tau} = \sum_q PF_{lqv\tau} + WPL_{lv\tau} \quad \forall (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.18)$$

$$PF_{lqv\tau} = (1 - w_{v\tau}) \cdot q_{qv\tau} \cdot PL_{lv\tau} \quad \forall (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.19)$$

La cantidad de descarte generada se calcula como sigue.

$$WPL_{lv\tau} = w_{v\tau} \cdot PL_{lv\tau} \quad \forall (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.20)$$

Terminado el proceso de clasificación y empacado, la fruta puede ser almacenada en frío, tanto en frío convencional ($PFCS_{cq\tau}$) como controlada ($PFCA_{aq\tau}$), o bien comercializada ($PFS_{qv\tau}$).

$$\sum_l PF_{lqv\tau} = PFS_{qv\tau} + \sum_c PFCS_{cq\tau} + \sum_a PFCA_{aq\tau} \Big|_{ICA_{v\tau}} \quad \forall (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.21)$$

El total de descarte generado en el proceso de clasificación ($W_{e\tau}^T$) se calcula como la sumatoria sobre las distintas líneas y variedades. Se contabiliza en especies (manzana y pera).

$$W_{e\tau}^T = \sum_{v \in (EV_{ev} \wedge HCS_{v\tau})} WPL_{lv\tau} \quad \forall (e, \tau) \in HCS'_{e\tau} \quad (D.22)$$

D.3. Almacenamiento en frío

Como se mencionó anteriormente, se han considerado dos tipos de frío para el almacenamiento de la fruta. Almacenamiento en frío convencional y en atmósfera controlada. A continuación se describe detalladamente cada uno.

D.3.1. Frío convencional

En esta sección se describen las ecuaciones utilizadas para representar la operatoria de las cámaras de frío convencional, en las cuales se puede almacenar tanto fruta sin procesar como procesada. Como se mencionó en la Sección 4.2 del Capítulo 4, no es posible almacenar en una misma cámara los dos tipos de fruta al mismo tiempo, así como tampoco mezclar peras y manzanas. Sin embargo, estas restricciones no son contempladas en el MPT dado que cada período de planeamiento comprende varios días.

Debe señalarse que aún cuando no sea posible considerar los aspectos de la operatoria de cámaras de FC mencionados anteriormente, el cálculo de stock de la fruta sin procesar y procesada se realiza por separado, dado que los flujos de entrada y de salida involucrados son diferentes. En ambos casos se calcula en función del stock del período anterior más la fruta que entra en el período actual, menos la que sale en el mismo período. En el caso del stock de fruta sin procesar la fruta que ingresa proviene únicamente de las chacras propias y de terceros ($FFCS_{cv\tau}$) y la que egresa se destina únicamente a las líneas de clasificación ($CSPL_{cv\tau}$). Por su parte, en el cálculo del stock de fruta procesada la corriente que ingresa corresponde a la fruta clasificada que proviene de las líneas de clasificación ($PFCS_{cq\tau}$) y la de salida se destina a comercialización ($CSS_{cq\tau}$).

$$S_{cv\tau}^{fnp} = S_{cv\tau-1}^{fnp} \Big|_{\tau > IEV_v} + FFCS_{cv\tau} \Big|_{HP_{v\tau}} - CSPL_{cv\tau} \quad \forall c, (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.23)$$

$$S_{cq\tau}^{fp} = S_{cq\tau-1}^{fp} \Big|_{\tau > IEV_v} + PFCS_{cq\tau} - CSS_{cq\tau} \quad \forall c, (v, \tau) \in HCS_{v\tau} \quad (D.24)$$

En el control de capacidad de almacenamiento se presentan diferencias entre las ecuaciones del MPT y las del MPO, por lo que las Ecuaciones D.25 y D.26, correspondientes al límite máximo y mínimo de fruta que se puede almacenar en caso de que la cámara de FC esté encendida, pueden únicamente ser aplicadas al MPT. Como la densidad de almacenamiento de la manzana y la pera es diferente, se acota a

la máxima de las dos (corresponde al límite impuesto por la pera, Tabla E.5), mientras que la capacidad mínima es única y es incluida para evitar guardar cantidades muy pequeñas de fruta. De esta forma, con el auxilio de la variable $Y_{c\tau}^c$ se controla adicionalmente si la cámara está siendo utilizada o no (1 si es utilizada y 0 en caso contrario), lo que posteriormente tiene un costo fijo asociado (Ecuación D.75).

$$\sum_{v \in HCS_{vp}} \left(S_{cvp}^{fnp} + \sum_q S_{cqv}^{fp} \right) \leq \max(e, \overline{S_{ce}^c}) \cdot Y_{cp}^c \quad \forall c, p \in HCS_p'' \quad (D.25)$$

$$\sum_{v \in HCS_{vp}} \left(S_{cvp}^{fnp} + \sum_q S_{cqv}^{fp} \right) \geq \underline{S_c^c} \cdot Y_{cp}^c \quad \forall c, p \in HCS_p'' \quad (D.26)$$

Finalmente, se agregan restricciones que controlan que la fruta que ingresó a las cámaras, salga en algún momento del horizonte de planeamiento. El control se realiza tanto para la fruta no procesada como para la procesada.

$$\sum_{\tau \in HP_{v\tau}} FFCS_{cv\tau} = \sum_{\tau \in HCS_{v\tau}} CSPL_{cv\tau} \quad \forall c, v \quad (D.27)$$

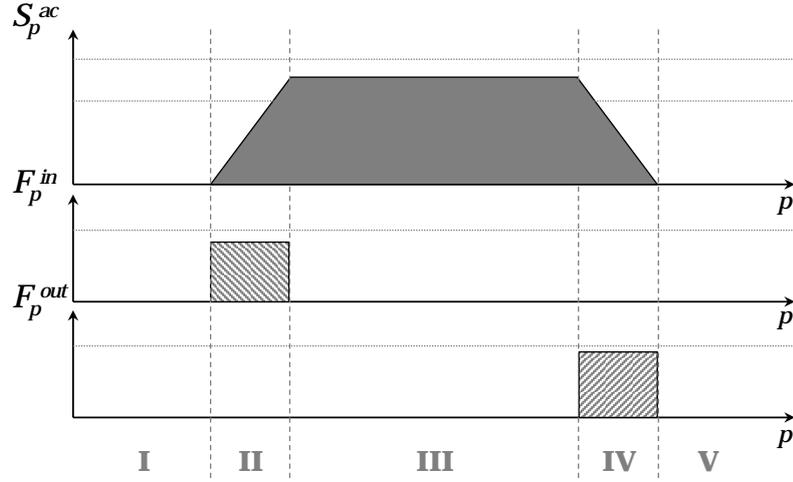
$$\sum_{\tau \in HCS_{v\tau}} PFCS_{cqv\tau} = \sum_{\tau \in HCS_{v\tau}} CSS_{cqv\tau} \quad \forall c, q, v \quad (D.28)$$

D.3.2. Atmósfera Controlada

El objetivo de esta sección del modelo es representar la operatoria del llenado, sellado, apertura y vaciado de las cámaras de atmósfera controlada. En la Figura D.2 se muestra el esquema utilizado para modelar todas las situaciones mencionadas, las cuales definen 5 etapas diferentes.

Para poder representar la operatoria de las cámaras de atmósfera controlada se desarrollaron las proposiciones lógicas que describen las situaciones necesarias. Una vez hecho esto, se las expresó de forma matemática.

Vale la pena aclarar que como ocurre con el control del período de contratación mínima, en esta sección los plazos máximos y mínimos asociados a las distintas etapas de la operatoria de cámaras de AC no pueden ser controlados estrictamente en el MPT, debido a la longitud no uniforme de los períodos del planeamiento táctico, por lo que son aproximadas de forma tal de que se asemejen a las cotas correspondientes del MPO (página 184 en el Apéndice E).



Etapa	Y	F_τ^{IN}	S_τ^{AC}	F_τ^{OUT}
I	$Y_{a\tau}^w=1$	$F_\tau^{IN}=0$	$S_\tau^{AC}=0$	$F_\tau^{OUT}=0$
II	$Y_{a\tau}^f=1$	$F_\tau^{IN} \leq \overline{F_\tau^{IN}}$	$S_\tau^{AC} \leq \overline{S_\tau^{AC}}$	$F_\tau^{OUT}=0$
III	$Y_{a\tau}^c=1$	$F_\tau^{IN}=0$	$\underline{S_\tau^{AC}} \leq S_\tau^{AC} \leq \overline{S_\tau^{AC}}$	$F_\tau^{OUT}=0$
IV	$Y_{a\tau}^p=1$	$F_\tau^{IN}=0$	$S_\tau^{AC} \leq \overline{S_\tau^{AC}}$	$F_\tau^{OUT} \leq \overline{F_\tau^{OUT}}$
V	$Y_{a\tau}^e=1$	$F_\tau^{IN}=0$	$S_\tau^{AC}=0$	$F_\tau^{OUT}=0$

Figura D.2 – Esquema del funcionamiento de las cámaras de AC.

La primera proposición establece que en caso de comenzar a llenarse una cámara, la misma debe ser cerrada antes de que se cumpla el plazo máximo de llenado.

$$Y_{a\tau}^{fp} \Rightarrow \left(Y_{a\tau}^{cp} \vee Y_{a\tau+1}^{cp} \vee \dots \vee Y_{a\tau+\Delta\tau^f}^{cp} \right)$$

$$Y_{a\tau}^{fp} \leq \sum_{\tau \leq \tau' \leq \tau + \Delta\tau^f} Y_{a\tau'}^{cp} \quad \forall a, \tau \in ICA'' \quad (D.29)$$

Una vez cerrada la cámara, la misma debe permanecer así al menos el plazo mínimo de estadía en frío ($\underline{\Delta\tau^c}$), por lo cual no puede ser abierta hasta que dicho lapso haya sido cumplido.

$$Y_{a\tau}^{cp} \Rightarrow \left(\neg Y_{a\tau}^{op} \wedge \neg Y_{a\tau+1}^{op} \wedge \dots \wedge \neg Y_{a\tau+\underline{\Delta\tau^c}}^{op} \right)$$

$$Y_{a\tau}^{cp} + Y_{a\tau'}^{op} \leq 1 \quad \forall a, \tau \in ICA'', \tau' \in OCA'', \tau \leq \tau' \leq \tau + \underline{\Delta\tau^c} \quad (D.30)$$

A su vez, si la cámara es cerrada, la misma debe ser abierta en algún momento del horizonte de planeamiento una vez cumplido el lapso mínimo de permanencia en

frío.

$$\begin{aligned}
Y_{a\tau}^{cp} &\Rightarrow \left(Y_{a\tau+\underline{\Delta\tau}^c+1}^{op} \vee \dots \vee Y_{aP}^{op} \right) \\
Y_{a\tau}^{cp} &\leq \sum_{\tau' \geq \tau + \underline{\Delta\tau}^c + 1} Y_{a\tau'}^{op} \quad \forall a, \tau \in ICA''_{\tau}
\end{aligned} \tag{D.31}$$

Una vez que la cámara ha sido abierta, la misma debe ser vaciada antes de que se cumpla el plazo máximo establecido para dicho proceso ($\overline{\Delta\tau}^p$).

$$\begin{aligned}
Y_{a\tau}^{op} &\Rightarrow \left(Y_{a\tau}^{ep} \vee Y_{ap\tau+1}^{ep} \vee \dots \vee Y_{a\tau+\overline{\Delta\tau}^p}^{ep} \right) \\
Y_{a\tau}^{op} &\leq \sum_{\tau \leq \tau' \leq \tau + \overline{\Delta\tau}^p} Y_{a\tau'}^{ep} \quad \forall a, \tau \in OCA''_{\tau}
\end{aligned} \tag{D.32}$$

Las siguientes proposiciones establecen el orden de las etapas. Si una cámara no ha comenzado a llenarse hasta el período τ , tampoco puede haber sido cerrada.

$$\begin{aligned}
\left(\neg Y_{a1}^{fp} \wedge \neg Y_{a2}^{fp} \wedge \dots \wedge \neg Y_{a\tau}^{fp} \right) &\Rightarrow \left(\neg Y_{a1}^{cp} \wedge \neg Y_{a2}^{cp} \wedge \dots \wedge \neg Y_{a\tau}^{cp} \right) \\
\sum_{\tau' \leq \tau} Y_{a\tau'}^{fp} &\geq \sum_{\tau' \leq \tau} Y_{a\tau'}^{cp} \quad \forall a, \tau \in ICA''_{\tau}
\end{aligned} \tag{D.33}$$

Si la cámara no ha sido cerrada hasta el período τ , tampoco podrá ser abierta antes de que pasen al menos $\underline{\Delta\tau}^c$ días a partir de τ .

$$\begin{aligned}
\left(\neg Y_{a1}^{op} \wedge \neg Y_{a2}^{op} \wedge \dots \wedge \neg Y_{a\tau}^{op} \right) &\Rightarrow \left(\neg Y_{a1}^{ep} \wedge \neg Y_{a2}^{ep} \wedge \dots \wedge \neg Y_{a\tau+\underline{\Delta\tau}^c}^{ep} \right) \\
\sum_{\tau' \leq \tau} Y_{a\tau'}^{op} &\geq \sum_{\tau' \leq \tau + \underline{\Delta\tau}^c} Y_{a\tau'}^{ep} \quad \forall a, \tau \in ICA''_{\tau}
\end{aligned} \tag{D.34}$$

De la misma forma, si una cámara no se ha abierto, tampoco puede haber sido vaciada.

$$\begin{aligned}
\left(\neg Y_{a1}^{cp} \wedge \neg Y_{a2}^{cp} \wedge \dots \wedge \neg Y_{a\tau}^{cp} \right) &\Rightarrow \left(\neg Y_{a1}^{op} \wedge \neg Y_{a2}^{op} \wedge \dots \wedge \neg Y_{a\tau}^{op} \right) \\
\sum_{\tau' \leq \tau} Y_{a\tau'}^{cp} &\geq \sum_{\tau' \leq \tau} Y_{a\tau'}^{op} \quad \forall a, \tau \in OCA''_{\tau}
\end{aligned} \tag{D.35}$$

Para acotar las posibilidades, se establece que las cámaras deben comenzar a llenarse en orden.

$$Y_{a\tau}^{fp} \Rightarrow \left(Y_{a-1,1}^{fp} \vee Y_{a-1,2}^{fp} \vee \dots \vee Y_{a-1,\tau}^{fp} \right)$$

$$Y_{a\tau}^{fp} \leq \sum_{\tau' \leq \tau} Y_{a-1\tau'}^{fp} \quad \forall a > 1, \tau \in ICA''_{\tau} \quad (D.36)$$

Por otro lado, no se está obligado a utilizar la cámara, por lo que:

$$\sum_{\tau \in ICA''_{\tau}} Y_{a\tau}^{fp} \leq 1 \quad \forall a \quad (D.37)$$

Sin embargo, una vez que se decide utilizar la cámara ($\sum_{\tau} Y_{a\tau}^{fp} = 1$), se la debe cerrar, cumplir el tiempo mínimo de frío y vaciarla en algún momento del horizonte de planeamiento.

$$\sum_{\tau \in ICA''_{\tau}} Y_{a\tau}^{cp} = \sum_{\tau \in ICA''_{\tau}} Y_{a\tau}^{fp} \quad \forall a \quad (D.38)$$

$$\sum_{\tau \in OCA''_{\tau}} Y_{a\tau}^{op} = \sum_{\tau \in ICA''_{\tau}} Y_{a\tau}^{fp} \quad \forall a \quad (D.39)$$

$$\sum_{\tau \in OCA''_{\tau}} Y_{a\tau}^{ep} = \sum_{\tau \in ICA''_{\tau}} Y_{a\tau}^{fp} \quad \forall a \quad (D.40)$$

Con el desarrollo de las proposiciones presentadas hasta ahora, se generan cortes enteros que controlan el correcto funcionamiento de las variables binarias para representar la operatoria de las cámaras de atmósfera controlada. Ahora resta definir las variables continuas que son función de dichas variables binarias e identifican en qué etapa del proceso se encuentra cada una de las cámaras. Estas variables son las mostradas en la Figura D.2, tienen valor unitario cuando el proceso se encuentra en la etapa asociada a la variable en cuestión, y un valor nulo en el resto de las etapas.

La variable $Y_{a\tau}^w$ vale uno cuando la cámara está vacía y disponible para utilizarse. Indica que se está en la primera etapa de operación de la cámara y pasará a tener valor nulo en el momento que la cámara comience a llenarse ($Y_{a\tau}^{fp} = 1$).

$$Y_{a\tau}^w = Y_{a\tau-1}^w - Y_{a\tau}^{fp} \Big|_{\tau \in ICA''_{\tau}} + 1 \Big|_{p=\min(IEV_v)-1} \quad \forall a, \tau \in HS''_{\tau} \quad (D.41)$$

El período de llenado de la cámara es identificado con $Y_{a\tau}^f$, que valdrá uno desde el momento en que la cámara comience a llenarse hasta que sea cerrada ($Y_{a\tau}^{cp} = 1$).

$$Y_{a\tau}^f = Y_{a\tau-1}^f \Big|_{p > \min(IEV_v)} + Y_{a\tau}^{fp} - Y_{a\tau-1}^{cp} \quad \forall a, \tau \in ICA''_{\tau} \quad (D.42)$$

Una vez cerrada la cámara, $Y_{a\tau}^c$ pasará a valer uno hasta tanto no sea abierta ($Y_{a\tau}^{op} = 1$).

$$Y_{a\tau}^c = Y_{a\tau-1}^c \Big|_{\tau > \min(IEV_v)} + Y_{a\tau}^{cp} \Big|_{\tau \in ICA''_{\tau}} - Y_{a\tau}^{op} \Big|_{\tau \in OCA''_{\tau}} \quad \forall a, \tau \in HS''_{\tau} \quad (D.43)$$

El período de vaciado queda delimitado por el momento en que la cámara es abierta y el momento en el que se ha extraído toda la fruta de su interior ($Y_{a\tau}^{ep}$).

$$Y_{a\tau}^p = Y_{a\tau-1}^p + Y_{a\tau}^{op} - Y_{a\tau-1}^{ep} \quad \forall a, \tau \in OCA''_{\tau} \quad (D.44)$$

Finalmente, $Y_{a\tau}^e$ valdrá uno a partir del instante en que toda la fruta de la cámara fue retirada.

$$Y_{a\tau}^e = Y_{a\tau-1}^e + Y_{a\tau}^{ep} \quad \forall a, \tau \in OCA''_{\tau} \quad (D.45)$$

A lo largo del horizonte de planeamiento, la cámara o bien aún no ha comenzado a llenarse, se está llenando, está cerrada, se está vaciando, o está vacía.

$$Y_{a\tau}^w + Y_{a\tau}^f \Big|_{\tau \in ICA''_{\tau}} + Y_{a\tau}^c + (Y_{a\tau}^p + Y_{a\tau}^e) \Big|_{\tau \in OCA''_{\tau}} = 1 \quad \forall a, \tau \in HS''_{\tau} \quad (D.46)$$

Una vez definidas todas las variables necesarias para poder representar el funcionamiento de las cámaras, se formulan las ecuaciones clásicas asociadas a unidades de almacenamiento.

El stock de fruta dentro de la cámara ($S_{aqv\tau}^a$) queda definido de forma general como el stock presente en el período anterior más la cantidad de fruta que ingresa ($PFC A_{aqv\tau}$) menos la que egresa en cada instante de tiempo ($CAS_{aqv\tau}$). Cabe destacar que debido a la particularidad de la operatoria de cámaras de atmósfera controlada, en ningún momento coincidirá que al mismo tiempo ingrese y egrese fruta de las mismas ($ICA_{v\tau} \cap OCA_{v\tau} = \emptyset$).

$$S_{aqv\tau}^a = S_{aqv\tau-1}^a + PFC A_{aqv\tau} \Big|_{ICA_{v\tau}} - CAS_{aqv\tau} \Big|_{OCA_{v\tau}} \quad \forall a, q, (v, \tau) \in HS_{v\tau} \quad (D.47)$$

La cantidad de fruta presente en la cámara en ningún momento puede sobrepasar la capacidad máxima de la misma. Con la variable binaria Y_{ae}^{ae} se controla que no se almacene en una misma cámara pera y manzana simultáneamente, restringiendo que la sumatoria de dicha variable sobre las especies deba tomar el valor de la sumatoria en p de Y_{ap}^{fp} que será igual a 1 solamente si la cámara es utilizada.

$$\sum_{q \in (EV_{ev} \wedge HS_{v\tau})} S_{aqv\tau}^a \leq \overline{S_{ae}^a} \cdot Y_{ae}^{ae} \quad \forall a, (e, \tau) \in HS'_{e\tau} \quad (D.48)$$

$$\sum_e Y_{ae}^{ae} = \sum_{\tau \in ICA''_{\tau}} Y_{a\tau}^{fp} \quad \forall a \quad (D.49)$$

Cuando $Y_{a\tau}^e$ vale 1, el stock de fruta debe ser nulo.

$$\sum_{qv} S_{aqv\tau}^a \leq M \cdot (1 - Y_{a\tau}^e) \quad \forall a, \tau \in OCA''_{\tau} \quad (D.50)$$

Al momento de cerrar la cámara ($Y_{a\tau}^{cp} = 1$), su stock de fruta debe ser mayor o igual a un volumen mínimo de ocupación, el cual es expresado como un porcentaje de la capacidad total (\underline{f}^a , ha sido considerado un 75 %).

$$\sum_{\substack{q \\ v \in ICA_{v\tau}}} S_{aqv\tau}^a \geq \underline{f}^a \cdot \min(e, \overline{S}_{ae}^a) \cdot Y_{a\tau}^{cp} \quad \forall a, \tau \in ICA''_{\tau} \quad (D.51)$$

La cantidad de fruta que ingresa y egresa de la cámara por período está limitada por cotas mínimas y máximas. A su vez, sólo puede ingresar fruta cuando se está en la segunda etapa del proceso ($Y_{a\tau}^f = 1$), del mismo modo solamente puede egresar fruta de la cámara cuando se está en la cuarta etapa ($Y_{a\tau}^p = 1$).

$$\sum_{\substack{q \\ v \in ICA_{v\tau}}} PFCA_{aqv\tau} \geq \underline{F}_{\tau}^i \cdot Y_{a\tau}^f \quad \forall a, \tau \in ICA''_{\tau} \quad (D.52)$$

$$\sum_{\substack{q \\ v \in ICA_{v\tau}}} PFCA_{aqv\tau} \leq \overline{F}_{\tau}^i \cdot Y_{a\tau}^f \quad \forall a, \tau \in ICA''_{\tau} \quad (D.53)$$

$$\sum_{\substack{q \\ v \in OCA_{v\tau}}} CAS_{aqv\tau} \geq \underline{F}_{\tau}^o \cdot Y_{a\tau}^p \quad \forall a, \tau \in OCA''_{\tau} \quad (D.54)$$

$$\sum_{\substack{q \\ v \in OCA_{v\tau}}} CAS_{aqv\tau} \leq \overline{F}_{\tau}^o \cdot Y_{a\tau}^p \quad \forall a, \tau \in OCA''_{\tau} \quad (D.55)$$

Por último se controla que la fruta que ingresó a la cámara egrese de la misma antes del final del horizonte de planeamiento.

$$\sum_{\tau \in ICA_{v\tau}} PFCA_{aqv\tau} = \sum_{\tau \in OCA_{v\tau}} CAS_{aqv\tau} \quad \forall a, q, v \quad (D.56)$$

D.4. Comercialización

La fruta que va a ser comercializada puede provenir de las líneas de clasificación ($PFS_{qv\tau}$), de las cámaras de frío convencional ($CSS_{cqv\tau}$) o bien de las cámaras de atmósfera controlada ($CAS_{aqv\tau}$), y se puede dirigir a los puertos, al mercado regional o al mercado local ($SM_{m_1qv\tau}$), siempre y cuando el mercado en cuestión acepte la variedad (AV_{m_1v} , Figura 4.3). En función de este último parámetro y del parámetro que indica la disponibilidad de la variedad en el mercado ($HS_{v\tau}$, que vale 1 una vez

que la cosecha de v ha comenzado), se define el parámetro $OM_{m_1v\tau} = AV_{m_1v} \cap HS_{v\tau}$ que relacionará en qué período τ la variedad v podrá ser comercializada en m_1 . Además, se debe recordar que cada mercado exige un mínimo de calidad (AQ_{m_1q} , Figura 4.3) y esto debe quedar explicitado en la ecuación. No obstante, aquí se considera que el precio pagado por la fruta en cada mercado, es independiente de la calidad. Se proporcionan perfiles de precios en el tiempo por mercado y por variedad, sin considerar la calidad de la misma (Ver Figura E.1). Los mismos han sido construidos sobre la base de información presentada en el Informe del Observatorio Frutícola (Storti, 2011). Con esta estrategia se pretende modelar el hecho de que un dado mercado no está dispuesto, en general, a pagar un precio superior por la fruta que está habituado a consumir aunque ésta sea de mejor calidad.

$$\left(PFS_{qv\tau} + \sum_c CSS_{cqv\tau} \right) \Big|_{HCS_{v\tau}} + \sum_a CAS_{aqv\tau} \Big|_{OCA_{v\tau}} = \sum_{\substack{m_1 \in AQ_{m_1q} \\ m_1 \in OM_{m_1v\tau}}} SM_{m_1qv\tau} \quad \forall q, (v, \tau) \in HS_{v\tau} \quad (D.57)$$

El hecho de incluir la posibilidad de almacenamiento en el frío en puerto, así como también el cronograma detallado de la estadía de los barcos en el puerto, genera la necesidad de tratar por separado la comercialización por vía terrestre y la correspondiente a ultramar.

Para el caso de venta por vía terrestre (mercado regional y local) se realiza la asignación directa de la variable relacionada con los precios para el cálculo de los ingresos ($SS_{m_1v\tau}$). Se efectúa la sumatoria en q ya que como se mencionó anteriormente, en los perfiles de precio proporcionados no se distingue por calidad.

$$SS_{m_1v\tau} = \sum_{q \in AQ_{m_1q}} SM_{m_1qv\tau} \quad \forall (m_1 \neq o, v, \tau) \in OM_{m_1v\tau} \quad (D.58)$$

Por su parte, la fruta destinada al mercado de ultramar ($m_1 = o$), debe ser enviada a alguno de los puertos. Es preciso declarar explícitamente que este mercado solamente acepta fruta de primera calidad ($q = q_1$) y que la misma puede ser despachada únicamente antes de que el último barco se retire del puerto h .

$$SM_{m_1qv\tau} \Big|_{AQ_{m_1q}} = \sum_h SM_{hv\tau}^h \quad \forall (v, \tau) \in OM_{m_1v\tau}, m_1 = o \quad (D.59)$$

El transporte terrestre está limitado por la cantidad de camiones disponibles para cada uno de los mercados considerados ($\overline{NT}_{m_1\tau}$, el valor de este parámetro es el que es cambiado en la Sección 4.4.3). Adicionalmente, como se describió en la

Sección 2.2.6 (página 27), los camiones utilizados para los diferentes destinos tienen distinta capacidad (TC_{m_1}).

$$\sum_{v \in OM_{m_1 v \tau}}^q SM_{m_1 q v \tau} \leq TC_{m_1} \cdot \overline{NT}_{m_1 \tau} \quad \forall \tau \in OM''_{m_1 \tau} \quad (D.60)$$

D.4.1. Comercialización Ultramar

En la Ecuación D.61 se establece que la fruta que llega al puerto ($SM_{hv\tau}^h$) es almacenada en el frío ($SO_{hv\tau}^{hc}$) o cargada directamente ($SO_{hbv\tau}^{hb}$) si el barco se encuentra en el puerto ($\tau \in EPS_{bh\tau}$, definido en función de los parámetros ETA_{bh} y ETD_{bh} , Tabla E.6). Como restricción adicional se incluye que solamente se puede subir al barco fruta de variedades aceptadas en el mercado de destino ($AV_{m_2 v}$, Figura 4.3). Para ello, es necesario suministrar la ruta de cada barco que arriba al puerto (R_{bm_2} , en la página 187) que incluye la información del mercado de destino. De esta forma, se define el parámetro $OB_{hbv\tau}$ como la intersección de la información proporcionada por los otros 3 parámetros:

$$OB_{hbv\tau} = EPS_{bh\tau} \cap AV_{m_2 v} \cap R_{bm_2}$$

$$SM_{hv\tau}^h = SO_{hv\tau}^{hc} + \sum_{b \in OB_{hbv\tau}} SO_{hbv\tau}^{hb} \quad \forall (h, v, \tau) \in OH_{hv\tau} \quad (D.61)$$

El stock de fruta almacenada en frío en puerto ($S_{hv\tau}^{hc}$) es igual a la cantidad presente ($S_{hv\tau-1}^{hc}$) más lo que llega determinado período ($SO_{hv\tau}^{hc}$) menos lo que se carga al barco en ese período ($SO_{hbv\tau}^{hb}$). Nuevamente para poder subir fruta al barco, es necesario que el mismo se encuentre en el puerto y que la variedad cargada sea aceptada en el mercado de destino.

$$S_{hv\tau}^{hc} = S_{hv\tau-1}^{hc} + SO_{hv\tau}^{hc} - \sum_{b \in OB_{hbv\tau}} SO_{hbv\tau}^{cb} \quad \forall (h, v, \tau) \in OH_{hv\tau} \quad (D.62)$$

Al igual que en los otros sectores de almacenamiento, el stock total de fruta debe ser menor a la capacidad disponible (\overline{S}_h^{hc} , Tabla E.5).

$$\sum_{v \in OH_{hv\tau}} S_{hv\tau}^{hc} \leq \overline{S}_h^{hc} \quad \forall (h, \tau) \in OH''_{h\tau} \quad (D.63)$$

Es necesario controlar que no quede fruta en las cámaras del puerto sin comercializar. Por lo tanto la fruta que entra ($SO_{hv\tau}^{hc}$), debe salir ($SO_{hbv\tau}^{cb}$) en algún momento del horizonte de planeamiento antes de que se vaya el último barco.

$$\sum_{\tau \in OH_{hv\tau}} SO_{hv\tau}^{hc} = \sum_{(b\tau) \in OB_{hbv\tau}} SO_{hbv\tau}^{cb} \quad \forall h, v \quad (D.64)$$

Finalmente, se realiza el cálculo de stock en el barco ($S_{bv\tau}^b$). Este es igual a lo que había en el período anterior ($S_{bv\tau-1}^b$), más lo que se subió desde el frío del puerto ($SO_{hbv\tau}^{cb}$) y los camiones que se cargaron directamente ($SO_{hbv\tau}^{hb}$). Dado que un mismo barco puede pasar por varios puertos (h), debe contabilizarse la fruta cargada en cada uno de ellos.

$$S_{bv\tau}^b = S_{bv\tau-1}^b + \sum_{h \in OB_{hbv\tau}} \left(SO_{hbv\tau}^{cb} + SO_{hbv\tau}^{hb} \right) \quad \forall (b, v, \tau) \in OB'_{bv\tau} \quad (D.65)$$

El volumen de venta a cada uno de los mercados de ultramar ($SS_{m_2v\tau}$) se extrae del stock del día que el barco deja el último puerto y se dirige a destino ($\tau = \max(h, ETD_{bh})$). Como en principio es posible que un mismo día parta más de un barco hacia el mismo destino, se realiza la sumatoria sobre b para contabilizar toda la fruta.

$$SS_{m_2v\tau} = \sum_{b \in R_{bm_2}} S_{bv\tau}^b \Big|_{\tau = \max(h, ETD_{bh})} \quad \forall (m_2, v, \tau) \in OM_{m_2v\tau} \quad (D.66)$$

D.4.2. Satisfacción de la demanda

Esta sección del modelo es exclusiva para el planeamiento táctico, por lo que las ecuaciones presentadas aquí tienen el índice de tiempo correspondiente a este planeamiento. Para poder medir el grado de apartamiento que presenta la respuesta propuesta a los perfiles de demanda considerados ($S_{m_3vp}^T$, Tablas E.14 y E.15), se definen dos variables: $\delta S_{m_3vp}^{T+}$ que calcula las diferencias positivas de los volúmenes de venta con respecto a la demanda y $\delta S_{m_3vp}^{T-}$ que calcula las correspondientes diferencias negativas.

Debido a que la fuente de información consultada para la elaboración de los perfiles (Funbapa, 2012), reporta volúmenes mensuales por especie para el caso de exportación, mientras que lo hace por variedad para el mercado interno, es necesario calcular los apartamientos de forma separada.

$$\sum_{v \in (EV_{ev} \wedge OM_{m_3vp})} SS_{m_3vp} = S_{m_3ep}^T + \delta S_{m_3ep}^{T+} - \delta S_{m_3ep}^{T-} \quad \forall (m_3 \neq MI, e, p) \in OM'_{m_3ep} \quad (D.67)$$

$$SS_{m_3vp} = S_{m_3vp}^T + \delta S_{m_3vp}^{T+} - \delta S_{m_3vp}^{T-} \quad \forall (m_3 = MI, v, p) \in OM_{m_3vp} \quad (D.68)$$

D.5. Ecuaciones de Costos

En esta sección se presentan las ecuaciones de los costos generados por cada una de las actividades consideradas. Los valores de los parámetros listados aquí, junto con su descripción pueden encontrarse en el Apéndice E. Al igual que para el caso de los precios, han sido extraídos del Informe del Observatorio Frutícola (Storti, 2011).

D.5.1. Obtención de Materia Prima

En primer lugar está el costo de recolección de la fruta (C_τ^{pp}), el cual se calcula como el producto del costo de recolección por *kg* (c_v^{pp} , Tabla E.7) y la cantidad de fruta recolectada ($PP_{v\tau}$).

$$C_\tau^{pp} = \sum_{v \in HP_{v\tau}} c_v^{pp} \cdot PP_{v\tau} \quad \forall \tau \in HP''_\tau \quad (\text{D.69})$$

De forma equivalente, se calcula el costo de la fruta fresca comprada a terceros (C_τ^{p3s}) como el producto entre el costo de la fruta de terceros (c_v^{p3s} , Tabla E.7) y la cantidad comprada ($F3s_{v\tau}$).

$$C_\tau^{p3s} = \sum_{v \in HP_{v\tau}} c_v^{p3s} \cdot F3s_{v\tau} \quad \forall \tau \in HP''_\tau \quad (\text{D.70})$$

D.5.2. Líneas de clasificación de fruta fresca

El costo de procesamiento en el galpón de empaque (C_τ^{pack}) es calculado en la Ecuación D.71. El parámetro $c_{m_1e}^{pack}$ (Tabla E.8) se discrimina por especie (*e*) y por mercado de destino (m_1) ya que los envases utilizados en el empaque dependen básicamente de estos dos parámetros. El costo de empaque es entonces directamente proporcional al volumen de venta ($SM_{m_1qv\tau}$).

$$C_\tau^{pack} = \sum_{(em_1) \in OM'_{m_1e\tau}} c_{m_1e}^{pack} \cdot \sum_{v \in (EV_{ev} \wedge OM_{m_1v\tau})} SM_{m_1qv\tau} \quad \forall \tau \in HS''_\tau \quad (\text{D.71})$$

El costo de mano de obra en el galpón de empaque (C_p^{mp}) se calcula como el producto entre el costo por turno (c_s^{mp} , Tabla E.9), la cantidad de turnos en operación (Y_{sp}^{tu}) y la longitud del período (L_p) de planeamiento táctico correspondiente.

$$C_p^{mp} = \sum_s (c_s^{mp} \cdot Y_{sp}^{tu}) \cdot L_p \quad \forall p \in HCS''_p \quad (\text{D.72})$$

Para el cálculo del costo de amortización en el galpón de empaque (C^{am}) se ha considerado una componente fija y otra variable. La primera, comprende la amortización de la construcción y las maquinarias utilizadas en el proceso de clasificación (fc^{am} , Tabla E.12). La segunda, corresponde a la amortización de los bins (vc_e^{am} , Tabla E.12). La cantidad de bins utilizados es función directa del volumen total de fruta empacada ($PF_{lqv\tau}$) y cambia según se trate de manzanas o peras, por lo que la componente variable de este costo es discriminada por especie.

$$C^{am} = fc^{am} + \sum_e vc_e^{am} \cdot \sum_{\substack{lqv\tau \\ (v\tau) \in (EV_{ev} \wedge HCS_{v\tau})}} PF_{lqv\tau} \quad (D.73)$$

D.5.3. Almacenamiento en frío - Frío Convencional

Se considera un costo variable de almacenamiento en cámaras de frío convencional (C_p^c) que se calcula en función del stock de fruta almacenada. Es necesario multiplicar por la longitud del período de planeamiento táctico para que el costo por kg por día (c_e^c , Tabla E.10) quede expresado correctamente.

$$C_p^c = \sum_e c_e^c \cdot \sum_{v \in (EV_{ev} \wedge HCS_{vp})} \left(S_{cvp}^{fnp} + \sum_q S_{cqv}^{fp} \right) \cdot L_p \quad \forall p \in HCS_p'' \quad (D.74)$$

También se considera un costo fijo (FC_p^c) contabilizado en caso de que la cámara esté siendo utilizada ($Y_{cp}^c = 1$). Vale la pena señalar que en este caso también es necesario afectar este costo por la longitud del período de planeamiento.

$$FC_p^c = fc \cdot \sum_c Y_{cp}^c \cdot L_p \quad \forall p \in HCS_p'' \quad (D.75)$$

D.5.4. Almacenamiento en frío - Atmósfera Controlada

Al igual que para el caso de cámaras de FC se considera un costo variable (C_p^a , Ecuación D.76) y un costo fijo (FC_p^a , Ecuación D.77) contabilizado cuando la cámara se encuentra en la Etapa II, III o IV (Figura D.2). En ambos casos es necesario multiplicar por L_p .

$$C_p^a = \sum_{eq} c_{eq}^a \cdot \sum_{v \in (EV_{ev} \wedge HS_{vp})} S_{aqvp}^a \cdot L_p \quad \forall p \in HS_p'' \quad (D.76)$$

$$FC_p^a = fc \cdot \sum_a \left(Y_{ap}^f \Big|_{ICA_p''} + Y_{ap}^c + Y_{ap}^p \Big|_{OCA_p''} \right) \cdot L_p \quad \forall p \in HS_p'' \quad (D.77)$$

D.5.5. Costo de logística y comercialización

El costo de logística y comercialización (C_τ^{log}) es función de la especie y del mercado de comercialización ($c_{m_1e}^{log}$, Tabla E.13). Vale la pena señalar que incluye el costo de transporte generado por la comercialización de la fruta.

$$C_\tau^{log} = \sum_{em_1} c_{m_1e}^{log} \cdot \sum_q SM_{m_1qv\tau} \quad \forall \tau \in HCS''_\tau \quad (D.78)$$

$v \in (EV_{ev} \wedge OM_{m_1v\tau})$

En este apartado también se contabiliza el costo generado por utilizar el servicio de frío en puerto (C_p^{hc}). Es calculado como un costo variable directamente proporcional al stock de fruta almacenada en las cámaras (S_{hvp}^{hc}) y a la longitud del período táctico (L_p). Dado que no se disponía de información de este costo, se supuso 5 veces el valor del máximo costo de frío propio.

$$C_p^{hc} = \sum_{h \in OH''_{hp}} c_h^{hc} \cdot \sum_{v \in OH_{hvp}} S_{hvp}^{hc} \cdot L_p \quad \forall p \in OH'''_p \quad (D.79)$$

D.5.6. Gastos generales

Finalmente, se calculan los gastos generales (C^{ov}) que incluyen todos aquellos gastos que son función del volumen comercializado y no se han incluido hasta ahora en alguno de los otros costos. Incluyen actividades como los gastos de tratamiento y traslado de la fruta, limpieza, gastos administrativos, etc. (Tabla E.12).

$$C^{ov} = c^{ov} \cdot \sum_{(m_1v\tau) \in OM_{m_1v\tau}} SM_{m_1qv\tau} \quad (D.80)$$

D.6. Ingreso por ventas

El ingreso económico (ING_τ) surge de la venta de la fruta fresca y el descarte generado en las chacras propias y en las líneas de clasificación. Los ingresos por venta de fruta fresca se calculan como el producto del precio de venta ($\phi_{m_3v\tau}$, Figura E.1) y el volumen de fruta comercializado ($SS_{m_3v\tau}$). Los perfiles de precios proporcionados están discriminados por mercado de destino y variedad. Por su parte, el ingreso generado por la venta del descarte se calcula como el producto entre el precio del descarte (ϕ_e^W , 0.1 U\$\$/kg para la manzana, 0.07 U\$\$/kg para la pera), el cual es

discriminado por especie, y el volumen comercializado correspondiente ($D_{e\tau}$ y $W_{e\tau}^T$).

$$ING_{\tau} = \sum_{(m_3v) \in OM_{m_3v\tau}} \phi_{m_3v\tau} \cdot SS_{m_3v\tau} + \phi_e^W \cdot (D_{e\tau} + W_{e\tau}^T) \quad \forall \tau \in HS''_{\tau} \quad (D.81)$$

D.7. Funciones objetivo

Para el MPT se ha decidido formular dos funciones objetivo diferentes.

En primer lugar se busca minimizar el nivel de incumplimiento de la demanda (δ^-), el cual permite cuantificar la capacidad de respuesta a los perfiles de demanda dada la infraestructura de la cadena de suministro (Ecuación D.82). Se calcula como la sumatoria de las diferencias negativas de las ventas con respecto a la demanda, presentadas en las Ecuaciones D.67 y D.68.

$$\delta^- = \sum_{(m_3 \neq MI, e, p) \in OM'_{m_3ep}} \delta S_{m_3ep}^{T-} + \sum_{(m_3 = MI, v, p) \in OM_{m_3vp}} \delta S_{m_3vp}^{T-} \quad (D.82)$$

La segunda función objetivo seleccionada a maximizar es el beneficio económico anual de la empresa (BEN). Se calcula como la diferencia entre los ingresos generados por ventas y los egresos generados por las distintas actividades de la cadena a lo largo del horizonte de planeamiento.

$$BEN = \sum_{p \in HS''_p} \left(\begin{aligned} &ING_p - (C_p^{pp} + C_p^{p3s}) \Big|_{HP''_p} - C_p^{hc} \Big|_{OH'''_p} \\ &- (C_p^{mp} + C_p^c + FC_p^c) \Big|_{HCS''_p} \\ &- C_p^{pack} - C_p^a - FC_p^a - C_p^{log} \end{aligned} \right) - C^{am} - C^{ov} \quad (D.83)$$

Apéndice E

Modelo planeamiento táctico y operativo - Datos del caso de estudio

E.1. Datos obtención de materia prima

En la Tabla E.1 se presenta el nivel de producción medio por variedad ($\overline{PP_v}$), junto con los valores de inicio y fin de recolección de cada variedad, tanto para el modelo de planeamiento táctico como el operativo. Por su parte el valor de desviación estándar (σ_{PP_v}) ha sido considerado para este estudio del 10 % para todos los casos. En lo que respecta al valor medio de descarte en chacra ($\overline{w_v^{PP}}$), el valor es de un 25 % para la manzana y de un 15 % para la pera. Los valores asociados a producción y descarte en chacra fueron obtenidos mediante información recopilada de productores e instituciones de la zona del Alto Valle.

Dado que la información provista al modelo está expresada en unidades de tiempo diferentes a las de nuestro problema, es necesario declarar una serie de parámetros. En primer lugar, en la Tabla E.2 se reportan los días de comienzo y final de los 12 meses del año, junto con los de los períodos de planeamiento táctico (IM_m , FM_m , IP_p y FP_p corresponden al día de inicio y fin de mes y período de planeamiento táctico, respectivamente). Posteriormente, en las Ecuaciones E.1–E.3 se relaciona al período t con las semanas, meses y períodos del planeamiento táctico, respectivamente.

Tabla E.1 – Valor medio de producción propia anual por variedad (\overline{PP}_v en toneladas) y período de inicio y fin de recolección de cada variedad (IEV_v y FEV_v).

Variedad	Producción anual (toneladas)	MPO		MPT	
		IEV_v	FEV_v	IEV_v	FEV_v
Red Delicious	5400	46	80	7	11
Gala	630	25	45	3	6
Granny Smith	1700	68	102	11	13
Cripps Pink	250	94	114	13	14
Williams	2800	12	45	2	6
Packams Triumph	1800	40	60	6	9
Beurre Danjou	1100	30	50	4	7
Abate Fetel	1000	36	56	5	8

$$r_{wt} \Big|_{7 \cdot (w-1) \leq t \leq 7 \cdot w} = 1 \quad \forall(w, t) \quad (\text{E.1})$$

$$r_{mt} \Big|_{IM_m \leq t \leq FM_m} = 1 \quad \forall(m, t) \quad (\text{E.2})$$

$$r_{pt} \Big|_{IP_p \leq t \leq FP_p} = 1 \quad \forall(p, t) \quad (\text{E.3})$$

En la Tabla E.3 se muestra el porcentaje de la cosecha recolectado en cada semana. Para calcular la distribución diaria, en el caso del modelo operativo, o por período de planeamiento táctico, se hace uso de los parámetros r_{wt} y r_{pt} (Ecuación E.4 y E.5, respectivamente).

$$DC_{vt} = \frac{DC_{vw} \Big|_{r_{wt}}}{7} \quad \forall(v, t) \in HP_{vt} \quad (\text{E.4})$$

$$DC_{vp} = \sum_{p \in r_{pt}} DC_{vp} \quad \forall(v, p) \quad (\text{E.5})$$

E.2. Datos clasificación y almacenamiento

En la Tabla E.4 se muestran los valores de distribución de calidad y descarte por variedad en las líneas de clasificación.

Por su parte, en la Tabla E.5 se listan los valores de parámetros relacionados a capacidades de distintos sectores de la cadena.

Tabla E.2 – *Día de inicio y finalización de los meses y períodos de planeamiento táctico.*

Meses (m)	Período MPT (p)	Parámetro			
		IM_m	FM_m	IP_p	FP_p
1	1	1	31	1	11
2	2	32	59	12	24
3	3	60	90	25	29
4	4	91	120	30	35
5	5	121	151	36	39
6	6	152	181	40	45
7	7	182	212	46	50
8	8	213	243	51	56
9	9	244	273	57	60
10	10	274	304	61	67
11	11	305	334	68	80
12	12	335	365	81	93
	13			94	102
	14			103	114
	15			115	129
	16			130	144
	17			145	153
	18			154	165
	19			166	170
	20			171	176
	21			177	180
	22			181	200
	23			201	207
	24			208	222
	25			223	234
	26			235	249
	27			250	264
	28			265	279
	29			280	294
	30			295	309
	31			310	324
	32			325	339
	33			340	354
	34			355	365

Tabla E.3 – Distribución de cosecha por variedad por semana (DC_{vw}) (%).

Variedad	Semanas de recolección													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Red Delicious	0	0	0	0	0	10	20	20	25	25	0	0	0	0
Gala	0	0	20	70	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Granny Smith	0	0	0	0	0	0	0	0	10	30	30	20	10	0
Cripp's Pink	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	40	30
William's	10	30	30	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Packam's	0	0	0	0	0	30	40	30	0	0	0	0	0	0
D'Anjou	0	0	0	0	30	40	30	0	0	0	0	0	0	0
Abate Fetel	0	0	0	0	0	0	0	30	40	30	0	0	0	0

Tabla E.4 – Parámetros de clasificación (%).

Variedad	q_{vp}			w_{vp}
	q_1	q_2	q_3	
Red Delicious	0.20	0.09	0.71	0.25
Gala	0.48	0.21	0.30	0.25
Granny Smith	0.27	0.19	0.54	0.35
Cripp's Pink	0.64	0.30	0.06	0.2
William's	0.48	0.28	0.24	0.15
Packam's	0.45	0.31	0.24	0.2
D'Anjou	0.65	0.33	0.02	0.22
Abate Fetel	0.62	0.31	0.06	0.23

Tabla E.5 – Valores de parámetros relacionados a capacidades de procesamiento (ton/día) y almacenamiento (ton).

Parámetros	Valores
\overline{FF}_p	330
\overline{PL}	32
PL	16
\overline{S}_{ae1}^a	604.2
\overline{S}_{ae2}^a	661.2
\overline{S}_{ce1}^c	604.2
\overline{S}_{ce2}^c	661.2
\overline{S}_h^{hc}	2000

Tabla E.6 – *Calendario de los barcos en el puerto.*

Barcos															
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	
b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}	b_{28}	b_{29}	b_{30}	
b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{34}	b_{35}	b_{36}	b_{37}	b_{38}	b_{39}	b_{40}	b_{41}	b_{42}	b_{43}	b_{44}	b_{45}	
ETA_{bh}	25	41	52	63	76	89	98	110	125	140	149	161	176	196	203
ETD_{bh}	29	45	56	67	80	93	102	114	129	144	153	165	180	200	207

Tabla E.7 – *Costos de fruta fresca propia y de terceros (U\$/kg).*

Parámetro	Valor		Unidad
	e_1	e_2	
c_v^{IP}	0.26	0.22	U\$/kg
c_v^{IBs}	0.46	0.39	U\$/kg

Los valores de los parámetros correspondientes a los plazos de las distintas etapas de la operatoria de las cámaras de atmósfera controlada para el MPO son: $\overline{\Delta t^f} = 8$, $\underline{\Delta t^c} = 120$ y $\overline{\Delta t^p} = 25$. Por su parte, para el MPT han sido aproximados los plazos correspondientes al llenado y vaciado de las cámaras a 2 períodos del planeamiento táctico, mientras que el correspondiente al período de estadía mínima se controla haciendo que la sumatoria del producto entre la variable asociada a esta etapa (Y_{ap}^c) y la longitud del período correspondiente (L_p) sea mayor a 120.

E.3. Datos comercialización ultramar

Los días de arribo de los barcos a puerto se muestran en la Tabla E.6. Para este caso de estudio, fue considerado que los primeros 15 barcos, se dirigen a la Unión Europea; los segundos 15 a USA; y los últimos 15 a Rusia. Todos los barcos parten 4 días después de haber arribado.

E.4. Datos costos

En las Tablas E.7, E.8, E.9, E.12, E.10, E.11 y E.13 se encuentran los distintos valores de costos utilizados en el modelo.

Tabla E.8 – Costo de empaquetado por especie y mercado de destino (U\$/kg).

Parámetro	Valor		
	Ultramar	Brasil	Mercado interno
$c_{m_1 e_1}^{pack}$	0.19	0.15	0.10
$c_{m_1 e_2}^{pack}$	0.15	0.14	0.12

Tabla E.9 – Costo de mano de obra de las líneas de clasificación (U\$/kg).

Parámetro	Valor
$c_{s_1}^{mp}$	7880
$c_{s_2}^{mp}$	8050
$c_{s_3}^{mp}$	8220

Tabla E.10 – Costos variables de almacenamiento en frío (10^4 U\$/kg).

Parámetro	Valor			
	q_1	q_2	q_2	
c_{eq}^a	e_1	14.9	7.9	7.5
	e_2	14.9	9.3	8.8
c_e^c	e_1	7.5		
	e_2	8.8		

Tabla E.11 – Costos fijos asociados a la conservación de la fruta (U\$).

Parámetro	Valor
c^{on}	1000
$c_{ff'}^{ch1}$	500
$c_{ee'}^{ch2}$	500
fc	1000

Tabla E.12 – Parámetros para el cálculo del costo de amortización y gastos generales.

Parámetro	Valor	Unidad
fc^{am}	25000	U\$/año
vc_e^{am}	0.12	U\$/kg
c^{ov}	0.027	U\$/kg

Tabla E.13 – Costo de logística, comercialización y transporte por especie y mercado de destino (U\$S/kg).

Parámetro	Valor		
	Ultramar	Brasil	Mercado interno
$c_{m_1e_1}^{log}$	0.20	0.10	0.12
$c_{m_1e_2}^{log}$	0.17	0.10	0.12

Tabla E.14 – Perfiles de demanda de exportación expresados en fracción del volumen total de fruta procesada (%).

Mercado	Meses											
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}
UEm	0.00	0.35	0.59	0.62	0.52	0.46	0.65	0.98	0.90	0.93	0.96	0.59
UEp	0.00	0.64	1.23	1.07	1.52	1.29	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rusiam	0.00	0.00	0.04	0.13	0.16	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rusiap	0.01	1.18	1.32	1.42	1.15	0.25	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
USAm	0.55	1.06	1.46	1.85	1.85	1.64	1.38	1.33	1.09	0.74	0.68	0.21
USAp	0.63	2.30	2.88	2.22	1.73	0.84	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Brasilm	0.32	1.25	1.29	0.94	0.25	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Brasilp	0.97	6.40	4.67	2.11	0.55	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

E.5. Datos Ventas

En las Tablas E.14 y E.15 se presentan los perfiles de demanda de referencia utilizados para los mercados de exportación y mercado interno, respectivamente. Por su parte, en la Figura E.1 se muestran los perfiles de precios considerados para las distintas variedades en los diferentes mercados de comercialización.

Tabla E.15 – Perfiles de demanda del mercado interno expresados en fracción del volumen total de fruta procesada (%).

MI	Meses											
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}
v_1	0.00	0.56	1.64	2.05	1.98	1.92	2.17	2.37	2.63	2.55	2.31	2.09
v_2	0.15	1.09	0.36	0.11	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
v_3	0.00	0.00	0.24	0.34	0.25	0.25	0.29	0.29	0.31	0.30	0.26	0.25
v_4	0.00	0.00	0.00	0.08	0.10	0.09	0.06	0.07	0.06	0.03	0.02	0.01
v_5	0.36	1.30	1.61	1.72	0.73	0.15	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
v_6	0.00	0.03	0.09	0.10	0.38	0.51	0.47	0.53	0.54	0.44	0.26	0.18
v_7	0.18	0.07	0.04	0.05	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
v_8	0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00

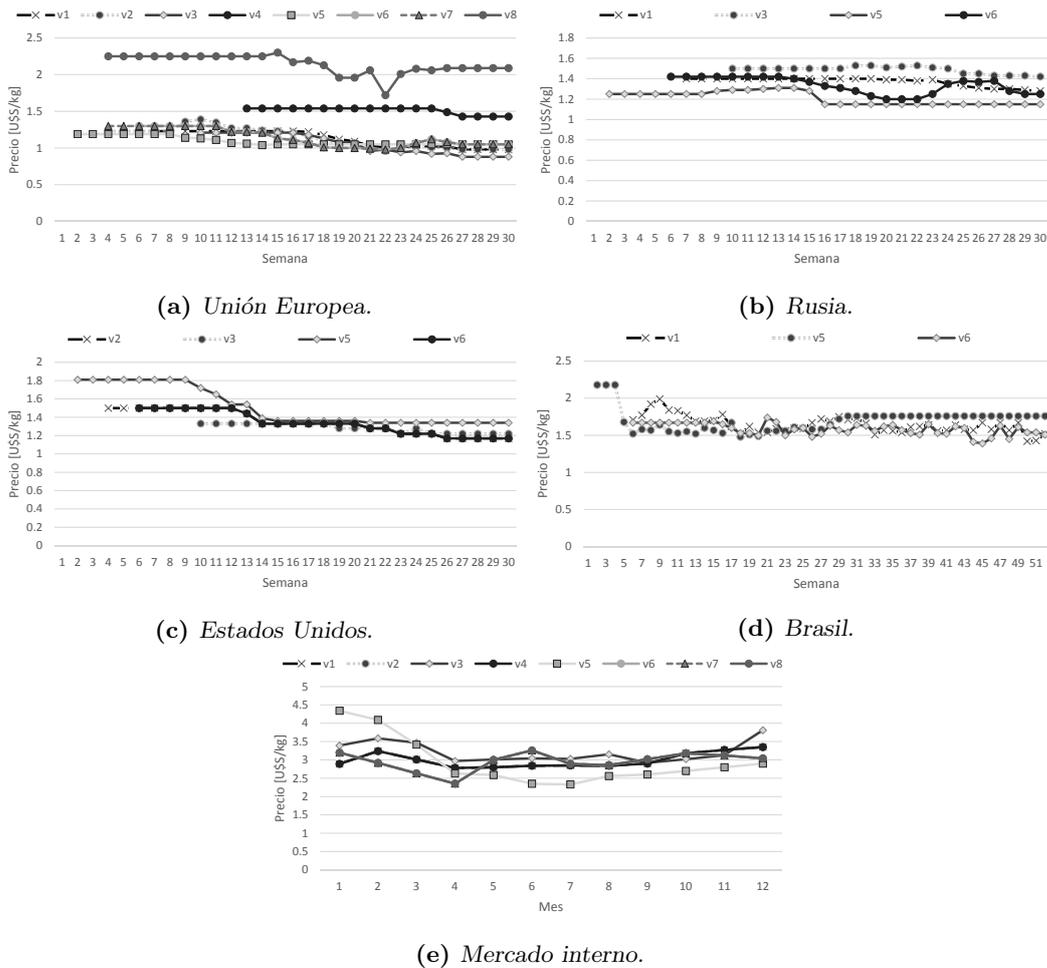


Figura E.1 – Perfiles de precios utilizados del año 2011.

Apéndice F

Modelo planeamiento táctico y operativo - Nomenclatura

Sets

v	Variedad
e	Especie (manzana - pera)
t	Período de planeamiento operativo
p	Período de planeamiento táctico
τ	Período de planeamiento genérico
w	Semana del año
l	Línea de clasificación
s	Turnos contratados de mano de obra
j	Plazo mínimo de contratación de mano de obra
q	Calidad de la fruta clasificada
c	Cámara de frío convencional
a	Cámara de atmósfera controlada
m	Mercados de comercialización
m_1	Destino de comercialización (ultramar, regional, interno)
m_2	Destino ultramar (UE, Rusia, USA)
m_3	Destinos de venta (UE, Rusia, USA, regional, interno)
h	Puerto
b	Barco

Parámetros

IEV_v	Período de inicio de recolección de la variedad
FEV_v	Período de finalización de recolección de la variedad
IP_p	Día de inicio del período de planeamiento táctico

FP_p	Día de finalización del período de planeamiento táctico
L_p	Longitud del horizonte de planeamiento táctico
$HP_{v\tau}$	1 si se está recolectando la variedad, 0 de otra forma
$HP'_{e\tau}$	1 si se está recolectando la especie, 0 de otra forma
HP''_{τ}	1 durante la temporada de recolección, 0 de otra forma
$HS_{v\tau}$	1 desde el comienzo de la recolección de cada variedad en adelante
$HS'_{e\tau}$	1 desde el comienzo de recolección de cada especie
HS''_{τ}	1 desde el comienzo de recolección de la primera variedad
$HCS_{v\tau}$	1 desde el comienzo de la recolección de la variedad hasta el límite de almacenamiento en FC por variedad
$HCS'_{e\tau}$	1 desde el comienzo de recolección de cada especie hasta el límite de almacenamiento en FC por especie
HCS''_{τ}	1 desde el comienzo de recolección de la primera variedad hasta el límite de almacenamiento en FC total
EV_{ev}	Relación entre especie y variedad
$ICA_{v\tau}$	1 desde el comienzo de la recolección de la variedad hasta el límite de ingreso a AC por variedad
$ICA_{e\tau}$	1 desde el comienzo de recolección de cada especie hasta el límite el límite de ingreso a AC por especie
ICA''_{τ}	1 desde el comienzo de temporada hasta el límite de ingreso en AC total
$OCA_{v\tau}$	1 después del límite mínimo de estadía en AC desde el comienzo de recolección de la variedad
OCA''_{τ}	1 después del límite mínimo de estadía en AC desde el comienzo de la temporada
AQ_{mq}	Calidad mínima exigida por cada mercado
AV_{mv}	1 si el mercado acepta la variedad, 0 de otra forma
$OM_{mv\tau}$	1 desde el comienzo de recolección de la variedad hasta período límite de comercialización de cada mercado
$OM'_{me\tau}$	1 desde el comienzo de recolección de la especie hasta período límite de comercialización de cada mercado
$OM''_{m_1\tau}$	1 desde el comienzo de temporada hasta período límite de comercialización de cada mercado
ETA_{bh}	Período de arribo del barco b al puerto h
ETD_{bh}	Período de partida del barco b del puerto h
$EPS_{bh\tau}$	Período de estadía del barco b en el puerto h
$OH_{hv\tau}$	1 desde el comienzo de recolección de la variedad hasta que el último barco deja el puerto
$OH'_{he\tau}$	1 desde el comienzo de recolección de la especie hasta que el último barco deja el puerto

$OH''_{h\tau}$	1 desde el comienzo de temporada hasta que el último barco deja el puerto
OH'''_{τ}	1 desde el comienzo de temporada hasta hasta que el último barco deja el último puerto
R_{bm_2}	1 si el barco se dirige al mercado, 0 de otra forma
$OB_{hbv\tau}$	1 si el barco b se encuentra en el puerto h y en el mercado al que se dirige, m_2 , aceptan la variedad v
$PP_{v\tau}$	Fruta propia disponible
$w_{v\tau}^{PP}$	Porcentaje de descarte por variedad producido en chacra
$DC_{v\tau}$	Porcentaje de recolección de la producción de cada variedad por período
$\overline{F3s}_{v\tau}$	Máxima cantidad de fruta disponible de terceros
$\underline{F3s}_{v\tau}$	Mínima cantidad de fruta a comprar a terceros
$PI_{v\tau}$	Descarte por variedad producido en chacra
$PG_{v\tau}$	Fruta fresca disponible para mandar a empaque
\overline{FF}_{τ}	Máxima cantidad de fruta fresca que se puede recibir en el empaque
M	Parámetro $BigM$
\overline{PL}	Capacidad máxima de procesamiento por línea por turno
\underline{PL}	Capacidad mínima de procesamiento por línea por turno
$w_{v\tau}$	Porcentaje de descarte producido en líneas de clasificación
$q_{qv\tau}$	Distribución de calidad por variedad
\overline{S}_{ae}^a	Capacidad máxima de almacenamiento en atmósfera controlada
\underline{F}_{τ}^i	Flujo mínimo de entrada a la cámara de atmósfera controlada
\underline{F}_{τ}^o	Flujo mínimo de salida de la cámara de atmósfera controlada
\overline{F}_{τ}^i	Flujo máximo de entrada a la cámara de atmósfera controlada
\overline{F}_{τ}^o	Flujo máximo de salida de la cámara de atmósfera controlada
$\overline{\Delta\tau}^f$	Período máximo de llenado de la cámara de atmósfera controlada
$\underline{\Delta\tau}^c$	Período de estadía mínimo en la cámara de atmósfera controlada
$\overline{\Delta\tau}^p$	Período máximo de vaciado de la cámara de atmósfera controlada
\overline{S}_{ce}^c	Capacidad máxima de almacenamiento en frío convencional
\underline{S}_e^c	Capacidad mínima de almacenamiento en frío convencional
TC_{m_1}	Capacidad máxima del camión por mercado m_1
$\overline{NT}_{m_1\tau}$	Disponibilidad de camiones por mercado m_1
c_v^{PP}	Costo por kg de producción de la fruta propia
c_v^{3s}	Costo por kg de la fruta de terceros
$c_{m_1e}^{pack}$	Costo de empaque
$\phi_{m_3v\tau}$	Precio de venta
c_s^{mp}	Costo de la mano de obra
fc^{am}	Componente fija de la amortización
vc_e^{am}	Componente variable de la amortización
c_{eq}^a	Costo de almacenamiento por kg en atmósfera controlada

c_e^c	Costo de almacenamiento por kg en frío convencional
fc	Costo fijo de almacenamiento en frío
$c_{m_1e}^{log}$	Costo de logística y comercialización
c^{ov}	Gastos generales
$\frac{c_h^{hc}}{S_h^{hc}}$	Costo de almacenamiento en frío del puerto
S_h^{hc}	Capacidad máxima de frío en puerto
<i>Variables</i>	
BEN	Beneficio económico anual
<i>Variables positivas</i>	
$FG_{v\tau}$	Fruta fresca propia enviada al galpón de empaque
$FI_{v\tau}$	Fruta fresca enviada a industria
$FF_{v\tau}$	Fruta fresca recibida en el galpón de empaque
De_{τ}	Fruta enviada a industria
$FFCS_{cv\tau}$	Fruta fresca enviada a frío convencional
$FFPL_{v\tau}$	Fruta fresca enviada a las líneas de clasificación
$PL_{lv\tau}$	Fruta procesada en las líneas de clasificación
$CSPL_{cv\tau}$	Fruta extraída de las cámaras de frío convencional enviada a las líneas de clasificación
$WPL_{lv\tau}$	Descarte generado en las líneas de clasificación
$PF_{lqv\tau}$	Fruta clasificada
$PFCS_{cqv\tau}$	Fruta clasificada enviada a frío convencional
$PFCA_{aqv\tau}$	Fruta clasificada enviada a las cámaras de atmósfera controlada
$PF_{sqv\tau}$	Fruta clasificada enviada a comercialización
$W_{e\tau}^T$	Descarte total de fruta generado por especie
$S_{aqv\tau}^a$	Stock de fruta en las cámaras de atmósfera controlada
$CAS_{aqv\tau}$	Fruta de las cámaras de atmósfera controlada enviada a comercialización
$CSS_{cqv\tau}$	Fruta de las cámaras de frío convencional enviada a comercialización
$Y_{a\tau}^w$	1 cuando la cámara no se ha comenzado a llenar, 0 de otra forma
$Y_{a\tau}^f$	1 cuando la cámara se está llenando, 0 de otra forma
$Y_{a\tau}^c$	1 cuando la cámara está cerrada, 0 de otra forma
$Y_{a\tau}^p$	1 cuando la cámara se está vaciando, 0 de otra forma
$Y_{a\tau}^e$	1 cuando la cámara se ha vaciado, 0 de otra forma
$S_{cv\tau}^{fnp}$	Stock de fruta no procesada en cámaras de frío convencional
$S_{cqv\tau}^{fp}$	Stock de fruta procesada en cámaras de frío convencional
$SS_{mv\tau}$	Volumen de venta comercializado
$SM_{hv\tau}^h$	Fruta enviada a puerto
$SM_{m_1qv\tau}$	Fruta enviada a los destinos de comercialización m_1
$NT_{m_1\tau}$	Camiones utilizados para el transporte
$SO_{hv\tau}^{hc}$	Fruta enviada al frío del puerto

$SO_{hbv\tau}^{hb}$	Fruta enviada al barco b
$SO_{hbv\tau}^{cb}$	Fruta enviada de las cámaras del puerto h al barco b
$S_{hv\tau}^{hc}$	Stock de fruta en frío del puerto
$S_{bv\tau}^b$	Stock de fruta en el barco
C_{τ}^{pp}	Costo de producción de la fruta propia
C_{τ}^{p3s}	Costo de la fruta comprada a terceros
C_{τ}^{pack}	Costo de clasificación y empaque
C_{τ}^c	Costo de almacenamiento en frío convencional
C_{τ}^a	Costo de almacenamiento en atmósfera controlada
FC_{τ}^a	Costo fijo de utilización de las cámaras de atmósfera controlada
FC_{τ}^c	Costo fijo de utilización de las cámaras de frío convencional
C_{τ}^{hc}	Costo de almacenamiento en frío de puerto
C_{τ}^{mp}	Costo de mano de obra
C^{am}	Amortización anual
C_{τ}^{log}	Costo de logística y comercialización
C^{ov}	Gastos generales anuales
ING_{τ}	Ingreso de dinero por venta de fruta

Variables binarias

$Y_{lv\tau}^{pl}$	1 si la variable v es procesada en l , 0 de otra forma
$Y_{s\tau}^{tu}$	1 si el turno s está contratado, 0 de otra forma
Y_{ae}^{ae}	1 si la especie e es almacenada en la cámara a , 0 de otra forma
$Y_{a\tau}^{fp}$	1 el período en el que comienza a utilizarse la cámara a , 0 de otra forma
$Y_{a\tau}^{cp}$	1 el período en el que la cámara a se cierra, 0 de otra forma
$Y_{a\tau}^{op}$	1 el período en el que la cámara a se abre, 0 de otra forma
$Y_{a\tau}^{ep}$	1 el período en el que la cámara a se vacía, 0 de otra forma
$Y_{c\tau}^c$	1 si la cámara está siendo utilizada, 0 de otra forma
Y_{ct}^{fnp}	1 si hay almacenada fruta no procesada en c , 0 de otra forma
Y_{ct}^{fp}	1 si hay almacenada fruta procesada en c , 0 de otra forma
Y_{cet}^{ce}	1 si se almacena la especie e , 0 de otra forma

Variables semicontinuas

$F3s_{v\tau}$	Fruta comprada a terceros
---------------	---------------------------

Bibliografía

- ABLIN, AMELIE: «El mercado del jugo concentrado de manzana». *Informe técnico*, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011.
- AL-AMERI, TAREQ A.; SHAH, NILAY y PAPAGEORGIOU, LAZAROS G.: «Optimization of vendor-managed inventory systems in a rolling horizon framework». *Computers & Industrial Engineering*, 2008, **54(4)**, pp. 1019 – 1047.
- ALVAREZ, JULIÁN; MORATTI, PABLO; ROMAGNOLI, SERGIO y VILLARREAL, PATRICIA: «Rentabilidad de establecimientos productores de fruta de pepita». *Informe técnico*, Alianza INTA-INTEC, 2000.
- AQUEVEQUE, JOSÉ DAMIÁN; DE FILIPPIS, ANGELA SOLEDAD; DE SOUZA, SAUEL JORGE; FLORES, MIGUEL ANGEL; GATICA, JAVIER LUCIANO; MORALES, LEONARDO ESTEBAN; PARRA, RODRIGO y VERGARA, MARIANELA NOEMÍ: «Fruticultura, la dulzura del valle». <http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi2000/rio-negro/fruticultura/>, 2000.
- AVELLÁ, BETIANA y MARCELO, VIÑUELA: «Variedades – Alto Valle de Río Negro (CAR 2005)». *Informe técnico*, Secretaría de Fruticultura de Río Negro, 2009.
- BASSETT, M.H.; DAVE, P.; DOYLE, F.J.; KUDVA, G.K.; PEKNY, J.F.; REKLAITIS, G.V.; SUBRAHMANYAM, S.; MILLER, D.L. y ZENTNER, M.G.: «Perspectives on model based integration of process operations». *Computers & chemical engineering*, 1996, **20(6)**, pp. 821–844. Fifth International Symposium on Process System Engineering.
- BEAMON, BENITA M: «Supply chain design and analysis: Models and methods». *International Journal of Production Economics*, 1998, **55(3)**, pp. 281 – 294.
- BEVILACQUA, MICAELA y STORTI, LUCIANA: «Complejo Frutícola: Manzana y Pera». *Informe técnico*, Secretaría de Política Económica, Subsecretaría de Programación Económica, Ministerio de Economía y Finanzas Públicas, 2011.

- BIDHANDI, HADI MOHAMMADI; YUSUFF, ROSNAH MOHD.; AHMAD, MEGAT MOHAMMAD HAMDAN MEGAT y BAKAR, MOHD RIZAM ABU: «Development of a new approach for deterministic supply chain network design». *European Journal of Operational Research*, 2009, **198(1)**, pp. 121 – 128.
- BLANCO, ANIBAL M.; MASINI, GUILLERMO L.; PETRACCI, NOEMÍ y BANDONI, J. ALBERTO: «Operations management of a packaging plant in the fruit industry». *Journal of Food Engineering*, 2005, **70(3)**, pp. 299–307.
- BLANK, LELAND y TARQUIN, ANTHONY: *Engineering Economy*. Mc-Graw Hill Science/Engineering/Math, New York, USA, 5ª edición, 2002.
- BROEKMEULEN, ROB ACM: «Operations management of distribution centers for vegetables and fruits». *International Transactions in Operational Research*, 1998, **5(6)**, pp. 501–508.
- BROOKE, ANTHONY; KENDRICK, DAVID; MEERAUS, ALEXANDER y RAMAN, RAMESH: *GAMS: A User's Guide*. The Scientific Press, South San Francisco, California, 1988.
- BRUZONE, IVÁN: «Cadenas Alimentarias. Manzana y pera». *Alimentos Argentinos*, 2010, **47**, pp. 18–24.
- CABRERA, IGNACIO FÉLIX: «Análisis de la exportación de manzanas y peras en el mercado externo en la última década», 2011. Trabajo Final, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Católica Argentina.
- CAFI: «Impacto actual de la crisis mundial en la fruticultura del Alto Valle de Río Negro y Neuquén». *Informe técnico*, Cámara Argentina de Fruticultores Integrados, 2008.
- : «Competitividad e impuestos: Frutas de pepita en Argentina». *Informe técnico*, Cámara Argentina de Fruticultores Integrados, 2010.
- CECERE, LORA; O' MARAH, KEVIN y PRESLAN, LAURA: «Driven by demand». *Supply Chain Management Review*, 2004, **8(8)**, pp. 15–16.
- CITTADINI, EDUARDO DANIEL; LUBBERS, MTMH; DE RIDDER, N; VAN KEULEN, H y CLAASSEN, GDH: «Exploring options for farm-level strategic and tactical decision-making in fruit production systems of South Patagonia, Argentina». *Agricultural Systems*, 2008, **98(3)**, pp. 189–198.

- DE-LEÓN ALMARAZ, SOFÍA; AZZARO-PANTEL, CATHERINE; MONTASTRUC, LUDOVIC; PIBOULEAU, LUC y BAEZ SENTIES, OSCAR: «Assessment of mono and multi-objective optimization to design a hydrogen supply chain». *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, **38(33)**, pp. 14121 – 14145.
- DE ROSSI, RAFAEL: «Evaluar variedades para la reconversión: una tarea pendiente». *Fruticultura y diversificación – INTA*, 2008, **57**, pp. 16–23.
- FUNBAPA: «Anuario Estadístico 2011 de Egreso de Peras y Manzanas de la Región Protegida Patagónica». *Informe técnico*, Funbapa, 2012.
- : «Anuario Estadístico 2012 de Egreso de Peras y Manzanas de la Región Protegida Patagónica». *Informe técnico*, Funbapa, 2013.
- GAMS: *The Solver Manuals*. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, 2009.
- GIUNTA, JORGE; SOLANES, FERNANDO y PALMA, RUBÉN: *Un desafío para nuevos mercados: los embalajes para frutas y hortalizas*. Editorial de la Universidad Nacional de Cuyo (EDIUNC), 1994.
- GONZÁLEZ LUQUE, LEONARDO: «Análisis comparado del proceso de inserción externa de Argentina y Chile en el sector de frutas de pepita: Escenario post Doha». *Informe técnico*, Confederaciones Rurales Argentinas – CRA, 2008.
- GROUPE DE TRAVAIL PRÉVISIONS POIRES: «Document de travail». *Informe técnico*, European Commission, 2013.
- GROUPE DE TRAVAIL PRÉVISIONS POMMES: «Document de travail». *Informe técnico*, European Commission, 2013.
- GUILLÉN-GONZÁLBEZ, GONZALO; MELE, FERNANDO D.; BAGAJEWICZ, M.J.; ESPUÑA, A. y PUIGJANER, L.: «Multiobjective supply chain design under uncertainty». *Chemical Engineering Science*, 2005, **60(6)**, pp. 1535 – 1553.
- GUILLÉN-GOSÁLBEZ, GONZALO y GROSSMANN, IGNACIO E.: «A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model». *Computers & Chemical Engineering*, 2010, **34(1)**, pp. 42 – 58.
- HARJUNKOSKI, LIRO; NYSTRÖM, RASMUS y HORCH, ALEXANDER: «Integration of scheduling and control—Theory or practice?» *Computers & Chemical Engineering*, 2009, **33(12)**, pp. 1909–1918.

- KEARNEY, MIKE: «An intertemporal linear programming model for pipfruit orchard replacement decisions». *MAF Policy Technical Paper*, 1994, **94/6**, p. 21.
- KOSTIN, ANDREI; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, GONZALO; MELE, FERNANDO D.; BAGAJEWICZ, M.J. y JIMÉNEZ, L.: «A novel rolling horizon strategy for the strategic planning of supply chains. Application to the sugar cane industry of Argentina». *Computers & Chemical Engineering*, 2011a, **35(11)**, pp. 2540 – 2563.
- KOSTIN, ANDREI; MELE, FERNANDO D. y GUILLÉN-GOSÁLBEZ, GONZALO: «Multi-objective optimization of integrated bioethanol-sugar supply chains considering different {LCA} metrics simultaneously». En: *21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, pp. 1276 – 1280. Elsevier, 2011b.
- KREIPL, STEPHAN y PINEDO, MICHAEL: «Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice». *Production and Operations Management*, 2004, **13(1)**, pp. 77–92.
- LESKOVAR, MARIO; LÓPEZ, ALVARO; MALASPINA, MARÍA; VILLARREAL, PATRICIA; ZUBELDÍA, HÉCTOR; AVELLA, BETIANA y BONDONI, MARIANO: «Costos referenciales de producción y empaque temporada 2010–2011, pera y manzana». *Informe técnico*, Secretaría de Fruticultura de Río Negro, Subsecretaría de Producción y Desarrollo Económico de Neuquén, EEA Alto Valle INTA, Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional del Comahue, 2010.
- LESKOVAR, MARIO LEOPOLDO: *Rentabilidad económica de las decisiones de almacenamiento frigorífico de manzana y pera en Argentina*. Tesis doctoral, Universitat de Lleida, 2006.
- LI, ZUKUI y IERAPETRITOU, MARIANTHI G.: «Rolling horizon based planning and scheduling integration with production capacity consideration». *Chemical Engineering Science*, 2010, **65(22)**, pp. 5887 – 5900.
- LIU, SONGSONG y PAPAGEORGIOU, LAZAROS G.: «Multiobjective optimisation of production, distribution and capacity planning of global supply chains in the process industry». *Omega*, 2013, **41(2)**, pp. 369 – 382.
- MARAVELIAS, CHRISTOS T y SUNG, CHARLES: «Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities». *Computers & Chemical Engineering*, 2009, **33(12)**, pp. 1919–1930.

- MARLER, R.T. y ARORA, J.S.: «Survey of multi-objective optimization methods for engineering». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004, **26(6)**, pp. 369–395.
- MASINI, GUILLERMO L.; BLANCO, ANIBAL M.; PETRACCI, NOEMÍ y BANDONI, J. ALBERTO: «Supply chain tactical optimization in the fruit industry». En: L. Pappageorgiou y M. Georgiadis (Eds.), *Supply Chain Optimization*, Wiley-VCH Book, 2007.
- MASINI, GUILLERMO L.; PETRACCI, NOEMÍ y BANDONI, J. ALBERTO: «Supply Chain Planning Optimization in the Fruit Industry». En: *Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO 2003)*, pp. 237–240. Coral Spring, Florida, USA, 2003.
- MAVROTAS, GEORGE: «Effective implementation of the ε -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems». *Applied Mathematics and Computation*, 2009, **213(2)**, pp. 455 – 465.
- MELE, FERNANDO D.; KOSTIN, ANDREW M.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, GONZALO y JIMÉNEZ, LAUREANO: «Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugar Cane Industry in Argentina». *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, **50(9)**, pp. 4939–4958.
- OPPENHEIM, PETER PAUL: *A linear programming approach to the evaluation of orchard adjustment strategies*. Department of Agricultural Economics and Farm Management. Massey University, 1979.
- : «The evaluation of orchard adjustment strategies: a linear programming approach to the development of rural policy in the SME sector». En: *Proceedings of the 16th Annual Conference of the Small Enterprise Association of Australia and New Zealand. Sept. 28th to Oct. 1st, , 2003*.
- ORTMANN, F.G: *Modeling the South African Fresh Fruit Export Supply Chain*. Tesis doctoral, University of Stellenbosch, South Africa, 2005.
- PAHL, JULIA y VOB, STEFAN: «Integrating Deterioration and Lifetime Constraints in Production and Supply Chain Planning: A Survey». *European Journal of Operational Research*, 2014.
- PAPAGEORGIOU, LAZAROS G.: «Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities». *Computers & Chemical Engineering*, 2009, **33(12)**, pp. 1931 – 1938.

- PEREA-LÓPEZ, EDGAR; YDSTIE, B.ERIK y GROSSMANN, IGNACIO E.: «A model predictive control strategy for supply chain optimization». *Computers & Chemical Engineering*, 2003, **27(8-9)**, pp. 1201 – 1218.
- PISHVAEE, M.S.; RAZMI, J. y TORABI, S.A.: «Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach». *Fuzzy Sets and Systems*, 2012, **206(0)**, pp. 1 – 20.
- PREISS, OSVALDO y DÍAZ, NORA: «Exportaciones de pera y manzana de Río Negro y Neuquén. Inserción en el mercado mundial y factores que condicionan su competitividad». En: *Jornadas PIEA*, , 2003.
- RODRIGUEZ, RODOLFO; VILLARREAL, PATRICIA; ROMITELLI, MAURICIO y LAGO, JONATAN: «Reinjertación». *Informe técnico*, Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle, Río Negro. Argentina, 2009.
- RONG, AIYING; AKKERMAN, RENZO y GRUNOW, MARTIN: «An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain». *International Journal of Production Economics*, 2011, **131(1)**, pp. 421 – 429.
- SABRI, EHAP H y BEAMON, BENITA M: «A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design». *Omega*, 2000, **28(5)**, pp. 581 – 598.
- SALVADOR, MARÍA EUGENIA y LAMFRE, LAURA: «Lineamientos estratégicos para el reposicionamiento de manzanas y peras con destino al mercado interno». *Informe técnico*, Consejo Federal de Inversiones, Neuquén, 2012.
- SÁNCHEZ, ENRIQUE EDUARDO y VILLARREAL, PATRICIA: «Programa Nacional Frutales – Cadena Frutales de Pepita». *Informe técnico*, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle, 2012.
- SAWIK, TADEUSZ: «A lexicographic approach to bi-objective scheduling of single-period orders in make-to-order manufacturing». *European Journal of Operational Research*, 2007, **180(3)**, pp. 1060 – 1075.
- : «Coordinated supply chain scheduling». *International Journal of Production Economics*, 2009, **120(2)**, pp. 437 – 451.

- SECRETARÍA DE FRUTICULTURA DE RÍO NEGRO: «Peras y Manzanas: breve evaluación de la temporada 2007». *Informe técnico*, Ministerio de Producción, Gobierno de Río Negro, 2007.
- SENASA: «Anuario estadístico.» *Informe técnico*, Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. Centro Regional Patagonia Norte, 2012.
- SHAH, BHAVIN J; SHAH, NITA H y SHAH, YK: «EOQ model for time-dependent deterioration rate with a temporary price discount». *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2005, **22(04)**, pp. 479–485.
- SHAH, NILAY: «Process industry supply chains: Advances and challenges». *Computers & Chemical Engineering*, 2005, **29(6)**, pp. 1225–1236.
- SHAPIRO, JEREMY F: *Modeling the supply chain*. DuxburyThomson Learning, 2001.
- SINCLAIR, DAVID y COOMBS, MARTIN: «Ferrocarriles en el cono sur». <http://www.ferrocarrilesenelconosur.co.uk/>, 1999.
- STORTI, LUCIANA Y OTROS: «Observatorio Frutícola, Peras y manzanas en Río Negro, Neuquén y Mendoza, primer informe técnico». *Informe técnico*, Ministerio de Economía y Finanzas Públicas y otros, 2011.
- STUDMAN, CLIFFOD J.: «Computers and electronics in postharvest technology - a review». *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, **30(1-3)**, pp. 109 – 124.
- SUBRAMANIAN, KAUSHIK; RAWLINGS, JAMES B.; MARAVELIAS, CHRISTOS T.; FLORES-CERRILLO, JESUS y MEGAN, LAWRENCE: «Integration of control theory and scheduling methods for supply chain management». *Computers & Chemical Engineering*, 2013, **51**, pp. 4 – 20.
- UIA: «Debilidades y desafíos tecnológicos del sector productivo, frutas de pepita». *Informe técnico*, Unión Industrial Argentina, 2008.
- USDA: «Fresh Deciduous Fruit (Apples, Grapes, & Pears): World Markets and Trade». *Informe técnico*, United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service, 2013.
- VAN DONK, DIRK PETER; AKKERMAN, RENZO y VAN DER VAART, TACO: «Opportunities and realities of supply chain integration: The case of food manufacturers». *British Food Journal*, 2008, **110(2)**, pp. 218–235.

- VERDOUW, C.N.; BEULENS, A.J.M.; TRIENEKENS, J.H. y WOLFERT, J.: «Process modelling in demand-driven supply chains: A reference model for the fruit industry». *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, **73(2)**, pp. 174 – 187.
- VILLARREAL, PATRICIA; LESKOVAR, MARIO LEOPOLDO; LÓPEZ, ALVARO; MALASPINA, MARÍA LAURA; ZUBELDÍA, HÉCTOR; BOLTSCHAUER, VERÓNICA; AVELLÁ, BETIANA y BONDONI, MARIANO: «Balance Frutícola. Temporada 2009–2010. Complejo Manzanas–Peras. Río Negro y Neuquén». *Informe técnico*, Convenio: Secretaría de Fruticultura de Río Negro, Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional del Comahue, Ministerio de Desarrollo Territorial – Provincia de Neuquén, EEA INTA Alto Valle, 2011.
- VILLARREAL, PATRICIA; ROMAGNOLI, SERGIO y LAGO, JONATAN: «El valor de la inversión de una plantación de frutales de alta densidad». *Informe técnico*, Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle, Río Negro. Argentina, 2008.
- WARD, LIONEL E y FARIS, J EDWIN: «A stochastic approach to replacement policies for plum trees». *Giannini Foundation of Agricultural Economics. University of California Division of Agricultural Sciences*, 1968, **22**.
- ZUBELDÍA, HÉCTOR: «Breve Comentario sobre el sector frutícola regional». *Informe técnico*, Secretaría de Fruticultura de Río Negro, 2007.
- ZUNINO, NATALIA: «La conformación del Alto Valle Frutícola». *Fruticultura y diversificación – INTA*, 2008, **58**, pp. 38–46.