



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

Análisis de las pérdidas de manzanas en Uruguay:

Modelado matemático multiobjetivo de la cadena de suministro

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero de Producción.

Matías Carricart

Julieta Merlo

Ximena Tellería

Tutores: Patricia Burzaco, María José Crosa y Adrián Ferrari

Montevideo, Uruguay
Marzo 2025

Resumen

El presente informe detalla el desarrollo de un modelo matemático de parte de la cadena de suministro de manzanas en Uruguay, abarcando las etapas de cosecha, almacenamiento y venta. El objetivo principal es optimizar las estrategias de almacenamiento y comercialización, maximizando los márgenes operativos y minimizando las pérdidas de manzanas generadas.

La cadena de suministro de manzanas es una de las más relevantes del sector frutícola del país, especialmente en la región sur. A partir de estudios realizados sobre las pérdidas de manzana a lo largo de la cadena, se identificó que el packing es un punto crítico, con pérdidas de hasta el 18 % del volumen almacenado [7].

Como parte de la metodología, se realizaron entrevistas con productores, operadores de packing, distribuidores mayoristas y minoristas (grandes superficies). El análisis de estas reveló dos aspectos clave: la calidad y durabilidad de la fruta están fuertemente influenciadas por la capacitación de la mano de obra empleada en la cosecha, y las pérdidas a lo largo de la cadena no suelen ser debidamente medidas ni controladas.

El alcance del modelo abarca las operaciones de un establecimiento productor y packing con una cartera de clientes variada, ubicado en la zona sur de Uruguay. El modelo desarrollado representa las decisiones asociadas a la selección del nivel de capacitación de la mano de obra, las cantidades destinadas al almacenamiento, los tiempos de conservación y las estrategias de comercialización. Se incorporaron tasas de deterioro y sus efectos sobre la calidad de la fruta, bajo el principio de garantizar la rentabilidad de la producción. Por ello, se adoptó un enfoque multiobjetivo, equilibrando la maximización del margen económico y la minimización de las pérdidas de manzanas.

La implementación se realizó mediante la aproximación de la “Frontera de Pareto” utilizando el “Método de Restricciones Épsilon”. El modelo demuestra una mayor sensibilidad hacia la maximización del margen económico que hacia la minimización de las pérdidas, lo cual es lógico, ya que las pérdidas ocurren cuando la fruta no se comercializa. En todas las simulaciones realizadas, se seleccionó consistentemente la mano de obra más capacitada. Esto impulsó el desarrollo de un escenario alternativo en el que se incluyó como variable la cantidad de árboles a plantar, fijando el nivel de capacitación de la mano de obra en su grado máximo. Este enfoque permitió obtener información adicional relevante, aunque se enfoca en decisiones estratégicas más que operativas.

Los análisis de sensibilidad y resultados, tomando como referencia un punto específico de la frontera, arrojan las siguientes conclusiones clave:

1. Maximizar el margen exige una reducción de las pérdidas, pero minimizar las pérdidas no siempre se traduce en un buen margen económico.
2. El calibre pequeño representa pérdidas grandes, por lo que venderlo directamente a sidrerías al momento de la cosecha evitaría costos innecesarios de almacenamiento.
3. Priorizar clientes de alto valor económico contribuye a mejorar los márgenes, aunque también incrementa las pérdidas debido a los estrictos estándares de calidad.
4. La mano de obra altamente capacitada es fundamental para optimizar la calidad del producto, reducir las pérdidas y maximizar los beneficios, lo que justifica el costo adicional asociado.
5. Es esencial realizar un monitoreo, control y medición adecuados del sistema, especialmente en la cámara de atmósfera controlada, para lograr una gestión eficiente del almacenamiento.

Palabras clave: cadena de suministro, pérdidas y desperdicio de alimentos, modelado matemático, optimización multiobjetivo, frontera de Pareto, planificación de almacenamiento y comercialización, calidad.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestros agradecimientos a todas las personas que han contribuido a la realización de este estudio. Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo, la guía y la colaboración de numerosas personas e instituciones.

En primer lugar, deseamos agradecer al equipo de tutores Patricia Burzaco, María José Crosa y Adrián Ferrari. Sus orientaciones durante las reuniones fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto. Su experiencia, críticas constructivas y aportes enriquecedores nos ayudaron a mejorar tanto la investigación realizada como el enfoque adoptado para abordar este tema. También extendemos nuestro reconocimiento al docente Pedro Piñeyro, de la Facultad de Ingeniería, por su disposición a compartir sus conocimientos en el área de investigación de operaciones y modelado matemático.

Asimismo, queremos destacar la colaboración de los entrevistados del sector, quienes generosamente compartieron sus conocimientos y experiencias: Pablo Pacheco (Jefe del Área de Información de UAM) y Juliana Bruzzzone (Coordinadora del Área de Desarrollo de UAM), Vicente Giudice (Productor y Packing de manzanas), Federico Veiga (Coordinador de Abastecimiento de Tienda Inglesa), Patricia De León (Productor y Packing de manzanas), Gustavo Moizo (Productor y Packing de manzanas), Julio Yaquina (Productor de manzanas) y Vivian Severino (Dra. Ing. Agrónoma). Además, agradecemos la oportunidad de visitar sus instalaciones, lo cual nos permitió obtener una comprensión más profunda de los desafíos, operaciones y dinámicas propias de la industria.

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) por brindarnos esta oportunidad. Este proyecto no solo representó un desafío académico, sino también una experiencia de aprendizaje que nos permitió desarrollar competencias tanto personales como profesionales. A lo largo de su desarrollo, tuvimos la posibilidad de integrar todo el conocimiento adquirido durante nuestra carrera en las distintas unidades curriculares, logrando una síntesis práctica y aplicada de las herramientas aprendidas.

Por último, agradecemos el apoyo de nuestras familias y amigos por acompañarnos a lo largo de nuestra formación y durante el transcurso de este trabajo.

Este informe es el resultado de un esfuerzo colectivo, y deseamos dedicar este espacio para reconocer y valorar la contribución de todos aquellos que hicieron posible su realización.

Índice

Agradecimientos	5
Índice de figuras	9
Índice de tablas	11
1. Glosario	13
2. Introducción	15
3. Marco teórico	17
3.1. Pérdidas y desperdicios de alimento a nivel global	17
3.1.1. Estimación de pérdidas y desperdicios de alimento en Uruguay	18
3.2. Cadena de suministro de Manzanas	18
3.2.1. Mercado de manzanas en Uruguay	18
3.2.2. Actores	19
3.3. Pérdidas de manzana en Uruguay	24
3.4. Modelado matemático multiobjetivo	30
3.4.1. Frontera de Pareto	30
3.4.2. Metodología de construcción de la frontera de Pareto	31
4. Descripción del problema	35
4.1. Definición del alcance	35
5. Modelado matemático	39
5.1. Descripción del modelo matemático	39
5.1.1. Hipótesis	39
5.1.2. Conjuntos	40
5.1.3. Parámetros	40
5.1.4. Variables de decisión	41
5.1.5. Restricciones	42
5.1.6. Función objetivo	45
5.2. Formulación del modelo matemático	45
6. Implementación del modelo matemático	49
6.1. Datos	49
6.2. Estrategia de implementación	50
7. Validación del modelo matemático	51
7.1. Caso base	51
7.2. Escenarios de Validación del Modelo	52
7.2.1. Capacidades de almacenamiento insuficientes	53
7.2.2. Restricciones de lote mínimo	53
7.2.3. Variaciones en los parámetros α y β	53
7.2.4. Costos de almacenamiento superiores a los precios de venta	53
7.3. Modificaciones introducidas a raíz del resultado de validaciones	53
8. Análisis de resultados	57
8.1. Ejecución del modelo matemático	57
8.2. Construcción de la frontera de Pareto	57
8.3. Interpretación de resultados	60

9. Análisis de sensibilidad	67
9.1. Análisis de sensibilidad sobre los precios de venta	67
9.2. Análisis de sensibilidad sobre las tasas de deterioro de calidad por almacenamiento	68
9.3. Análisis de sensibilidad sobre la distribución de calibres en los bins	69
9.4. Análisis de sensibilidad sobre la calidad máxima inicial	70
9.5. Análisis de sensibilidad sobre porcentaje de pérdidas y costo de mano de obra . .	71
9.6. Análisis de sensibilidad sobre las proporciones de las variedades de manzanas . .	73
9.6.1. Análisis de sensibilidad sobre el total de árboles plantados	74
9.7. Análisis de sensibilidad sobre la relación calidad-precio	75
9.8. Análisis de sensibilidad sobre la proporción de demanda de los clientes	76
9.9. Análisis de sensibilidad sobre los costos de almacenamiento	76
10. Formulación alternativa	77
10.1. Construcción de la frontera de Pareto	77
10.2. Interpretación de resultados	79
10.3. Análisis de sensibilidad	80
10.3.1. Análisis de sensibilidad sobre la distribución de calibres en los bins	81
10.3.2. Análisis de sensibilidad sobre la relación calidad-precio	81
11. Conclusiones	83
12. Perspectivas y continuidad del estudio	85
13. Bibliografía	87
14. Anexo	89
14.1. Anexo electrónico (Redactado)	89
14.2. Entrevistas	89
14.2.1. Vicente Giudice - Packing y productor (Redactado)	89
14.2.2. Pablo Pacheco y Juliana Bruzzzone - UAM (Mayorista) (Redactado) . . .	89
14.2.3. Federico Veiga - Coordinador Supply Chain Tienda Inglesa (Redactado) .	89
14.2.4. Patricia de León - Packing y productora (Redactado)	89
14.2.5. Gustavo Moizo - Productor y Packing (Redactado)	89
14.2.6. Julio Yaquinta - Productor (Redactado)	89
14.2.7. Vivian Severino - Ingeniera Agrónoma (Redactado)	89

Índice de figuras

1.	Relación entre actores de la cadena de suministro de manzanas. Fuente: elaboración propia.	20
2.	Monte de manzanos. Fuente: elaboración propia.	21
3.	Entrada de un packing en Uruguay. Fuente: elaboración propia.	22
4.	Baño de conservación. Fuente: elaboración propia.	22
5.	Bins de manzana almacenados en cámara de almacenamiento convencional. Fuente: elaboración propia.	23
6.	Manzanas separadas para descarte. Fuente: elaboración propia.	25
7.	Manzanas almacenadas para la venta. Fuente: elaboración propia.	26
8.	Etapas del proceso y porcentaje de pérdidas sobre el total de ingreso a cada etapa de acuerdo con [7].	27
9.	Principales defectos para las variedades Red Delicious y Cripps Pink según [8].	28
10.	Ejemplo de frontera de Pareto de acuerdo con [3].	31
11.	Ejemplo de frontera de Pareto obtenida a través del método propuesto, de acuerdo con [3]	33
12.	Diagrama de flujo de la metodología para la construcción de la frontera de Pareto de acuerdo con [3].	34
13.	Distribución de la cantidad de manzanas clasificadas por variedad según los ingresos al Mercado Modelo-UAM entre 2019 y 2023. Fuente: elaboración propia basada en [39]	36
14.	Diagrama de alcance del proyecto. Fuente: elaboración propia.	37
15.	Resultados de la validación para las funciones de maximizar margen y minimizar pérdidas, respectivamente.	52
16.	Puntos obtenidos a partir de la metodología para aproximar la frontera de Pareto.	59
17.	Frontera de Pareto generada.	60
18.	Resumen del comportamiento del sistema para el punto de máximo margen.	61
19.	Resultados de la implementación por calibres.	63
20.	Resultados de la implementación por variedades.	65
21.	Puntos obtenidos en la formulación alternativa para construcción de la frontera de Pareto.	78
22.	Frontera de Pareto generada en la formulación alternativa.	79

Índice de tablas

1.	Estimación de parámetros α y β . Fuente: elaboración propia basada en [21] y [10].	50
2.	Resultados para el caso base.	51
3.	Valores obtenidos en la implementación al optimizar cada una de las funciones, e imponiendo restricciones sobre las funciones relegadas.	58
4.	Restricciones impuestas para la construcción de la frontera de Pareto.	58
5.	Cantidad de bins de cada variedad que se extraen de cámara de atmósfera controlada a lo largo del tiempo.	62
6.	Pérdidas en packing por calibre y variedad.	64
7.	Ventas obtenidas por calibre, variedad y cliente.	64
8.	Escenarios de aumento de precios de venta para el mercado mayorista y el supermercado.	67
9.	Análisis de sensibilidad de los precios de venta.	68
10.	Resultados de α y β por variedad y caso.	69
11.	Análisis de sensibilidad de las tasas de deterioro de calidad por almacenamiento.	69
12.	Distribución porcentual por variedad, caso y calibre.	70
13.	Análisis de sensibilidad de la distribución de calibres en los bins.	70
14.	Variación de Q_{max} , pérdidas, margen y MO.	71
15.	Análisis de sensibilidad sobre porcentaje de pérdidas y costo de mano de obra.	72
16.	Resultados de análisis por caso: Máximo margen, pérdidas y tipo de MO.	73
17.	Cantidad de árboles plantados por variedad de manzana.	74
18.	Pérdidas, margen y variación para diferentes distribuciones de variedades.	74
19.	Datos del análisis de sensibilidad sobre el total de árboles plantado.	74
20.	Resultados del análisis de sensibilidad sobre el total de árboles plantados.	75
21.	Análisis de sensibilidad del efecto de la calidad en el precio.	75
22.	Análisis de sensibilidad de la proporción de demanda de clientes.	76
23.	Análisis de sensibilidad ante el aumento de costos de almacenamiento.	76
24.	Valores obtenidos para la formulación alternativa al optimizar cada una de las funciones, e imponiendo restricciones sobre las funciones relegadas.	77
25.	Restricciones impuestas en la formulación alternativa sobre las respectivas funciones objetivo para la construcción de la frontera de Pareto.	78
26.	Comparación de cantidad de árboles por variedad en la formulación original y la alternativa.	80
27.	Pérdidas en packing por calibre y variedad en la formulación alternativa.	80
28.	Ventas por calibre y variedad obtenidas en la formulación alternativa.	81
29.	Análisis de sensibilidad de la distribución de calibres para la cantidad de árboles alternativa.	81
30.	Análisis de sensibilidad del efecto de la calidad en el precio para la cantidad de árboles obtenida en la formulación alternativa.	82

1. Glosario

- **Bin:** envase para almacenar y transportar fruta. En Uruguay los bins utilizados son de madera o plástico, y en promedio almacenan 400 kilogramos de manzanas.
- **Cadena de suministro:** “El intercambio de materiales e información en el proceso logístico, desde la adquisición de las materias primas hasta la entrega del producto final al cliente. Todos los proveedores, servicios y clientes son parte de la cadena de suministro” [6].
- **Calibre:** “El calibre se define como el diámetro máximo de la sección ecuatorial o el peso del fruto” [12].
- **Cámara de almacenamiento convencional:** las cámaras de almacenamiento convencional son espacios en los que se almacena la fruta por períodos cortos de tiempo, entre las actividades de clasificación y venta. Estas cámaras no cuentan con atmósfera modificada ni controlada, ya que no se modifica la composición de gases ni la presión dentro de ellas. El único parámetro controlado en este tipo de cámaras es la temperatura. En este informe, se utilizarán las siglas “CC” para hacer referencia a este tipo de cámaras de almacenamiento.
- **Cámara de almacenamiento de atmósfera controlada:** las cámaras de atmósfera controlada son espacios en los que, además de la temperatura, se controlan los niveles de diferentes gases, principalmente oxígeno y dióxido de carbono. Este control de la atmósfera ralentiza el proceso de descomposición de la fruta, lo que las hace ideales para la conservación a largo plazo. En el presente informe, se utilizarán las siglas “AC” para hacer referencia a este tipo de cámaras de almacenamiento.
- **Desperdicio de alimentos:** “Pérdidas de alimentos que ocurren al final de la cadena alimentaria (venta minorista y consumo final)” [15].
- **Gap:** diferencia entre dos valores.
- **Margen:** diferencia entre la venta y los costos, es el beneficio económico que se percibe del negocio. En este informe, el término hace referencia al margen que se obtiene sin considerar costos fijos ni deducciones impositivas, únicamente se consideran costos directos.
- **Packing:** “Sitio específico en el que ingresa la fruta extraída de campo. Parte esencial de la cadena de suministro en el sector agrícola. El objetivo de un packing frutícola es almacenar la fruta, procesarla y empacarla.” [2].
- **Pérdidas de alimentos:** las pérdidas de alimentos refieren a la disminución de la cantidad de alimentos de consumo humano que ocurren en las etapas de producción, poscosecha y procesamiento de la cadena de suministro [15].
- **Puntos críticos de pérdidas:** “Los puntos críticos de pérdida son las fases de la cadena de suministro de alimentos donde las pérdidas de alimentos tienen la mayor magnitud, los efectos más importantes en la seguridad alimentaria y las dimensiones económicas más amplias.” [15].
- **Raleo:** acción de arrancar flores del árbol para garantizar frutos resultantes de mayor tamaño [15].

2. Introducción

En Uruguay, el cultivo de manzanas es el principal entre los árboles de hoja caduca y constituye el fruto que moviliza el mayor volumen de ventas en la Unidad Agroalimentaria de Montevideo, dentro de los productos de producción nacional [25]. Las manzanas disponibles en los distintos puntos de consumo son el resultado del esfuerzo conjunto de múltiples eslabones que integran la cadena de suministro.

La integración de estos eslabones es crucial para el óptimo funcionamiento de la cadena, pero representa una tarea sumamente delicada y compleja debido a la contraposición de intereses existentes entre los diferentes actores. Los clientes requieren un suministro constante que garantice la satisfacción de su demanda, manteniendo la mejor calidad posible a lo largo del año. Estas condiciones imponen restricciones sobre los productores, quienes deben planificar de manera rigurosa para cumplir con la demanda y obtener un resultado rentable económicamente. [30] [18]

La planificación adecuada de la venta es un aspecto crítico en la generación de pérdidas de manzanas, dado que su cadena de suministro involucra un producto perecedero y hay una demanda uniforme a lo largo de todo el año. Por estas razones, es esencial desarrollar estrategias de almacenamiento y comercialización que no solo cumplan con los requerimientos de los clientes, sino que también disminuyan las pérdidas de manzanas. Estas estrategias deben estar acompañadas por una planificación del cultivo y buenas prácticas en el campo acordes, para lograr la reducción de pérdidas a lo largo de toda la cadena de suministro.

Dado que aproximadamente el 60 % de las pérdidas generadas ocurren en los niveles de cosecha y almacenamiento [24], se decidió abordar el problema enfocándose en estos actores. Para ello, se trabajó en el desarrollo de un modelo matemático destinado a asistir a los actores de los eslabones productor y packing en la toma de decisiones, con el objetivo de reducir las pérdidas al mínimo posible y maximizar el margen económico.

En este informe se describe el trabajo realizado sobre la problemática de las pérdidas generadas en la cadena de suministro de manzanas, abordada a través de una herramienta de optimización. Para el desarrollo de esta herramienta se realizó un análisis exhaustivo de la literatura sobre el modelado de cadenas de suministro, que sirvió como base para el modelo propuesto. Además, se realizó un estudio detallado sobre la relevancia y el contexto de la producción de manzanas a nivel nacional. Como complemento, se llevaron a cabo relevamientos in situ con diversos productores y packing, lo que permitió obtener una comprensión más profunda de los procesos involucrados, desde la cosecha hasta el procesamiento de la fruta, incluyendo la clasificación y el almacenamiento para su venta.

Se realizaron visitas y entrevistas a actores del sector, las cuales facilitaron el entendimiento de los procesos, permitiendo la traducción de estos a un lenguaje matemático para su posterior optimización. El modelo desarrollado propone estrategias de almacenamiento y venta, indicando cómo gestionar el inventario disponible.

El modelo considera factores como el deterioro de la fruta durante el almacenamiento y el impacto de este al momento de la venta. Incorpora los requerimientos de calidad exigidos por los clientes y el impacto que estos tienen sobre los precios. Asimismo, contempla el efecto del grado de capacitación de la mano de obra en los resultados económicos, en la reducción de pérdidas durante la cosecha y en la calidad de la fruta cosechada.

De esta forma, el modelo matemático multiobjetivo de programación lineal desarrollado cumple con el objetivo del presente trabajo de grado: ofrecer una herramienta para una toma de decisiones más precisa, que optimice las estrategias de almacenamiento y venta, buscando maximizar el margen y minimizar las pérdidas de manzanas. La resolución del modelo utilizando el lenguaje AMPL y el software Gurobi permitió obtener una solución óptima que representa un plan de almacenamiento y ventas para la configuración de datos relevada.

Además, se llevaron a cabo varios análisis de sensibilidad para evaluar los resultados desde

distintas perspectivas. Estos análisis permitieron identificar los parámetros con mayor impacto en los resultados, lo que facilitó el estudio de diversos escenarios y la generación de respuestas ante eventos como incrementos en los precios de mercado o fluctuaciones en la demanda.

El documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: la sección 3 presenta la investigación y estudio de la bibliografía relacionada, contextualizando la problemática a nivel nacional. La sección 4 se centra en la descripción del problema y la definición del alcance del estudio. En la sección 5 se presenta de forma integrada el modelo matemático desarrollado, incluyendo todos sus componentes, mientras que en la sección 6 se describe la obtención del conjunto de datos utilizados y la estrategia para la implementación.

La sección 7 detalla los casos de validación realizados para verificar el correcto funcionamiento del modelo elaborado, mientras que la sección 8 contiene el análisis de los resultados de la implementación del modelo. La sección 9 aborda los análisis de sensibilidad realizados y la interpretación de los resultados obtenidos de los mismos.

La sección 10 presenta una formulación alternativa del modelo, que surge a raíz de uno de los análisis de sensibilidad de la sección anterior. Finalmente, las secciones 11 y 12 contienen las conclusiones extraídas del presente estudio y las perspectivas a futuro para continuar el trabajo realizado, respectivamente.

3. Marco teórico

En esta sección se proporciona el contexto necesario para abordar la temática de este estudio. En primer lugar, en la sección 3.1 se presenta una descripción general de las pérdidas y desperdicio de alimentos de manera global. En la sección 3.1.1 se aborda específicamente la situación en Uruguay. Posteriormente, en la sección 3.2 se analiza la cadena de suministro de manzanas en Uruguay, destacando sus principales características y actores clave. En la sección 3.3 se detallan las causas principales de pérdidas en las manzanas. Finalmente, en la sección 3.4 se introducen las bases del modelado matemático multiobjetivo y un método de resolución para el mismo.

3.1. Pérdidas y desperdicios de alimento a nivel global

Las pérdidas y desperdicio de alimentos representan un problema significativo a nivel mundial, con impactos en los ámbitos social, económico y ambiental. Según [15], el impacto económico incluye los efectos indirectos que la reducción de la pérdida y desperdicio de alimentos tiene sobre la pobreza, el crecimiento de los ingresos, la seguridad alimentaria y la nutrición. Las pérdidas evitables de alimentos afectan directamente a agricultores y consumidores; especialmente a los pequeños productores que operan al límite de su capacidad. Pequeñas mejoras en la optimización de recursos y la reducción de pérdidas pueden tener un impacto significativo en sus vidas. Además, esta optimización beneficia económicamente a los consumidores, ya que los costos de los alimentos pueden reducirse, facilitando su acceso.

En el aspecto ambiental, la reducción de pérdidas y desperdicio a lo largo de la cadena de suministro implica una menor necesidad de producir, procesar y transportar alimentos, lo que reduce el uso de recursos, las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación, beneficiando al medio ambiente [14]. El impacto social es más complejo, ya que depende en gran medida de la ubicación geográfica de la población afectada y de la etapa en la cadena de suministro donde ocurren las reducciones.

Es crucial hacer una distinción clara entre las pérdidas y el desperdicio de alimentos a lo largo de la cadena de suministro. Según [15], ambos conceptos se refieren a la “disminución en cantidad o calidad de los alimentos como resultado de decisiones y acciones de los proveedores de alimentos en la cadena”. Sin embargo, mientras que las pérdidas de alimentos se centran en las etapas de producción, poscosecha, almacenamiento y venta mayorista, sin considerar a los minoristas, proveedores de servicios alimentarios y consumidores, el desperdicio de alimentos se centra específicamente en estos actores.

A la fecha de este estudio, muy pocos estudios a nivel mundial han abordado las pérdidas y desperdicio de alimentos a escala global. El estudio más reciente sobre pérdidas de alimentos a nivel mundial, utilizando el Índice de Pérdidas de Alimentos (FLI, por sus siglas en inglés), revela que aproximadamente el 13,8 % de los alimentos producidos en 2016 se perdieron a lo largo de la cadena de suministro. Esta cifra varía regionalmente, con estimaciones que oscilan desde el 5-6 % en regiones como Australia y Nueva Zelanda, hasta el 20-21 % en Asia Central y Meridional. En América Latina y el Caribe, el porcentaje de pérdidas de alimentos se sitúa entre el 11-12 %. En cuanto a los grupos de alimentos, las raíces, tubérculos y cultivos oleaginosos muestran el mayor nivel de pérdidas, seguidos por las frutas y verduras. No obstante, no es sorprendente que las frutas y verduras experimenten altos niveles de pérdida debido a su naturaleza delicada y altamente perecedera. [15].

Según la UNEP, en 2019 se generaron aproximadamente 931 millones de toneladas de desperdicio alimentario, lo que refiere a un 17 % de la producción global de alimentos. De este total, el 61 % provino de los hogares, el 26 % de los servicios de alimentación, y el 13 % de la venta minorista [35].

Según [13] se indica que, en general, en los países industrializados se desperdicia mucho más alimento per cápita que en los países en desarrollo. En las naciones de bajos ingresos, las

principales causas de pérdidas y desperdicio de alimentos están relacionadas con limitaciones económicas, técnicas deficientes de aprovechamiento, mala gestión de recursos, instalaciones inadecuadas, condiciones climáticas adversas y sistemas de comercialización ineficientes. Por estas razones, las mayores pérdidas de alimentos ocurren durante las etapas iniciales e intermedias de la cadena de suministro. En contraste, en los países de ingresos medios y altos, las pérdidas y desperdicio de alimentos se deben principalmente al comportamiento del consumidor, la falta de conciencia y la falta de coordinación entre los diferentes actores de la cadena de suministro, concentrándose el mayor desperdicio en la etapa de consumo.

3.1.1. Estimación de pérdidas y desperdicios de alimento en Uruguay

La disponibilidad de documentación sobre las pérdidas y desperdicio de alimentos en Uruguay es limitada. Sin embargo, es posible su abordaje mediante los estudios presentados a continuación. Estudios recientes del Observatorio Granjero (Camm, MGAP) muestran que en la cadena de frutas y hortalizas se descarta alrededor del 1,5 % del total ingresado por día en el mercado mayorista, lo que equivale a 16,3 toneladas diarias. Se estima que aproximadamente 2,4 toneladas podrían ser recuperadas y redistribuidas, lo que representa unas 6.000 raciones/día potencialmente aprovechables. Además, se menciona que las 13,9 toneladas restantes podrían ser recicladas de diversas formas, como alimento animal o compostaje. [24].

Otros informes, como el proyecto TCP URU 2903 realizado por la FAO en 2004(b), destacan que las pérdidas en la cadena de frutas y hortalizas oscilan entre el 5 % y el 10 % en la cosecha y almacenamiento, con un promedio del 2,5 % en la etapa mayorista. A nivel minorista y de consumo, las pérdidas varían entre el 2 % y el 6 %, y entre el 2,5 % y el 10 %, respectivamente. Otro informe relacionado con el mismo proyecto TCP realizado por la FAO en 2004(a), estima un total de pérdidas en la cadena de frutas y hortalizas de alrededor de 24.000 toneladas al año, con un valor de aproximadamente 6.456.000 dólares anuales, distribuidas principalmente entre las etapas mayorista y minorista. [24].

Según [24], alrededor del 10 % de los alimentos disponibles para el consumo humano en Uruguay se pierden o desperdician anualmente, lo que equivale a cerca de 1 millón de toneladas, con un valor estimado de 600 millones de dólares en materia prima. En los hogares uruguayos, se estima que el desperdicio alcanza entre 33 y 36 kg por persona al año, una cifra intermedia en comparación con otros países. Las mayores pérdidas se concentran en las etapas de producción y poscosecha, representando el 58 % del total, mientras que un 11 % ocurre en las etapas mayorista y minorista, y un 20 % a nivel del consumidor. Específicamente para frutas y hortalizas, las pérdidas y desperdicio a lo largo de la cadena de suministro representaron un 12 % en volumen y un 23 % en valor monetario.

Las cifras mencionadas son consistentes con las estimaciones globales presentadas en la sección 3.1 y reflejan la situación típica de un país en desarrollo como Uruguay, donde las mayores pérdidas se registran en las etapas iniciales e intermedias del proceso, mientras que una proporción menor se observa en la etapa del consumidor.

3.2. Cadena de suministro de Manzanas

3.2.1. Mercado de manzanas en Uruguay

El manzano es el principal cultivo de hoja caduca en Uruguay, con una superficie plantada en el entorno de 2.100 hectáreas. Se concentra básicamente en los departamentos del sur del país: Montevideo (fundamentalmente en la zona de Melilla), Canelones y San José. Los rendimientos anuales del país oscilan en torno a las 50.000 toneladas para la serie de años de la última década, aunque en las últimas zafas (2018 y 2020) ha habido considerables bajas en las cantidades producidas, alcanzando valores de tan solo 36.000 toneladas anuales. [1].

Según la encuesta frutícola de hoja caduca realizada por el MGAP para la zafra de 2016, la

manzana es por amplia mayoría el cultivo con mayor área y también mayor volumen de cosecha, aportando, en esta zafra, el 60 % de la producción total [26]. En este mismo año, la manzana fue la fruta que reportó los mayores ingresos económicos en el Mercado Modelo dentro de las frutas y hortalizas producidas nacionalmente. [25].

Al igual que en muchos otros sectores, en la producción y distribución de manzanas se ha observado un marcado proceso de incorporación de tecnología [24]. Esto incluye equipos que asisten en la cosecha durante la fase productiva, maquinaria para el control de calidad de la fruta (como el control de calibre, coloración y presencia de defectos), e incluso tecnologías para la conservación posterior de las manzanas, como su almacenamiento en cámaras de conservación con atmósfera modificada o controlada. Si bien las adaptaciones del proceso productivo a los cambios tecnológicos son necesarias para mantener la capacidad competitiva, muchas veces los problemas asociados con la gestión del proceso productivo y la coordinación de los diferentes eslabones de la cadena son más relevantes para lograr un incremento en calidad o productividad, que la introducción de tecnología en si misma.

De igual forma, la incorporación de tecnología debe estar acompañada de personal apto para su uso e implementación en los procesos actuales. Tal como fue expresado por [9] y [30], la mano de obra representa un factor clave en lo que respecta a la calidad de la fruta obtenida, así como para la generación de pérdidas de la misma. Contar con personal suficientemente capacitado para la gestión de tareas manuales es de gran importancia, y resulta ser una tarea más compleja de lo que aparenta.

Entre otras, las razones anteriormente expuestas explican la notoria baja en la cantidad de productores de manzanas que se produjo en el último tiempo. Sin ir muy lejos temporalmente, en 2019 había 427 productores registrados en el RNPFH (Registro nacional de productores fruti-hortícolas) de DIGEGRA, mientras que los registros para el período 2022-2023 muestran tan solo 388 productores registrados, habiendo un decremento del 10 %. [27].

3.2.2. Actores

En esta sección se describen los principales agentes de la cadena de suministro de manzanas. No se considerará como actor para este modelo al consumidor, dado que la información disponible sobre las pérdidas generadas a nivel del consumidor final no es precisa. [24].

En la Figura 1 se muestra un esquema de las relaciones entre los eslabones de la cadena de suministro de manzanas. Si bien estas conexiones representan las relaciones que podrían establecerse, no implica que cada eslabón de la cadena necesariamente establezca todas ellas. Como se puede ver, el productor es el eslabón base de la cadena de suministro de manzanas. Es quien produce el insumo que da sentido a la cadena en sí, y por ello todos los demás actores dependen, en última instancia, de los productores para asegurar el abastecimiento de las manzanas. Sin embargo, el resto de los eslabones también desempeñan un rol fundamental, ya que establecen condiciones y restricciones que afectan la operativa del proceso productivo. De esta forma, el flujo de producto e información a lo largo de la cadena responde a relaciones de intereses entre los distintos actores, quienes tienen como primer objetivo sacar el mayor provecho posible de la negociación, perdiendo de vista otros aspectos importantes como la generación de pérdidas de manzanas resultante.

Productor

Como fue antes mencionado, según [27] los últimos datos arrojan que hay 388 productores registrados en el RNPFH, sin embargo solamente el 5 % de estos son responsables de la mitad del volumen producido anualmente. Los productores constituyen el primer eslabón en la cadena de producción de manzanas, siendo principalmente negocios familiares. Según señala [30], muchos de ellos han quebrado debido a problemas de escala, la relación entre la oferta y la demanda y el cambio generacional. “Antes, con tan solo 5 hectáreas se podía vivir bien, pero en la actualidad, incluso con 25 hectáreas es difícil mantenerse sin realizar inversiones significativas y adaptarse constantemente a las nuevas exigencias del mercado. Los productores que concentran

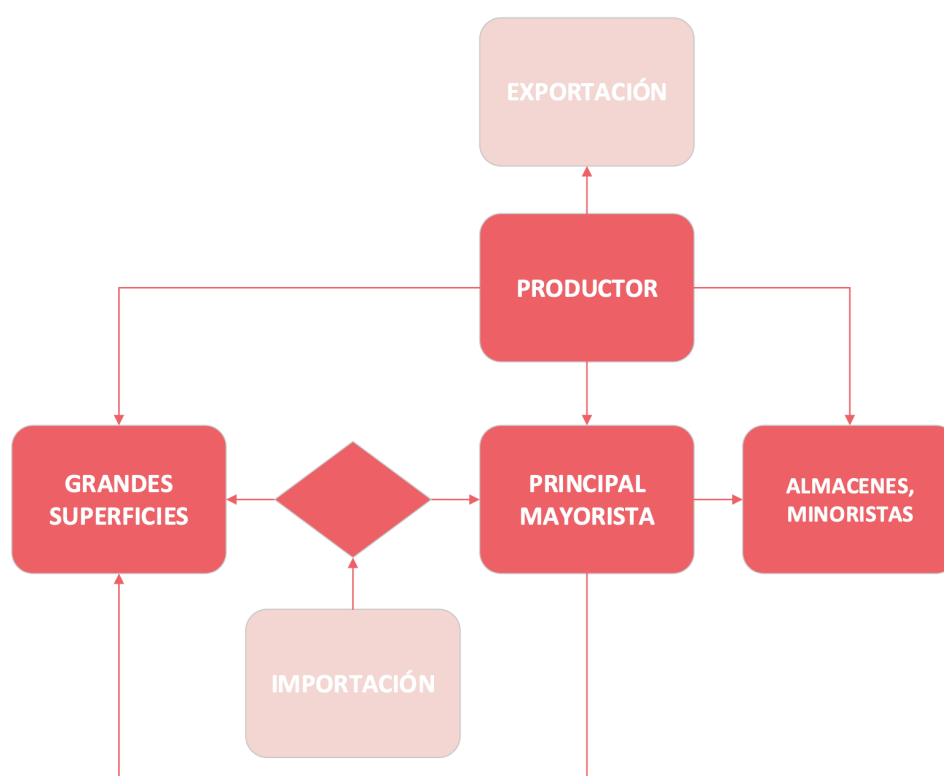


Figura 1: Relación entre actores de la cadena de suministro de manzanas. Fuente: elaboración propia.

la mayor parte del mercado gestionan explotaciones agrícolas de menos de 50 hectáreas, ubicadas mayoritariamente en la región sur del país, abarcando los departamentos de Montevideo, San José y Canelones, donde se concentra el 95 % de los manzanos” [30].

Los productores son responsables de todas las etapas del cultivo, desde la preparación del suelo, la plantación, la gestión del monte y la cosecha. Estas actividades requieren un uso intensivo de recursos naturales, humanos y de capital. Estos buscan maximizar la calidad del producto y la cantidad producida mediante la aplicación de tecnologías y metodologías de producción agrícola [23]. En la Figura 2 se puede ver parte de la plantación de un monte de manzanos de uno de los productores entrevistados.

La relación de los productores con otros actores de la cadena varía según su método de comercialización [23]. Aquellos que venden directamente en mercados mayoristas pueden contar con un puesto propio en la UAM, o vender su producción a agentes que tengan una demanda a satisfacer dentro del mercado [18]. Por otro lado, los productores que establecen contratos con supermercados deben cumplir con estrictos requisitos de calidad y volumen establecidos por estos minoristas. Según [41], los contratos entre productores y supermercados se manejan generalmente por servicio y volumen total, y suelen establecerse por trimestre o cuatrimestre, dependiendo de la disponibilidad de fruta. Los acuerdos se basan en la fijación de un determinado precio para que el costo sea predecible y el supermercado mantenga su margen. Si el proveedor no cumple con el costo o la calidad del producto, la tienda puede optar por otro proveedor.

Entre los aspectos clave en los que participan los productores se encuentra la toma de decisiones sobre el tipo de variedades de manzanas a cultivar, el uso de tecnologías y técnicas de cultivo, y la gestión de recursos. Sin embargo, su poder sobre las decisiones de precios es limitado, estando frecuentemente influenciados por las condiciones del mercado y las negociaciones con intermediarios y minoristas. [18].

Packing



Figura 2: Monte de manzanos. Fuente: elaboración propia.

El proceso de almacenamiento y empaque de las manzanas se lleva a cabo en establecimientos denominados packing. En la Figura 3, se observa la entrada a uno de los packing visitados durante el relevamiento. La fruta llega al packing después de ser cosechada en la quinta. Si se trata de fruta recién cosechada que será vendida en el futuro, se le aplica un baño de conservación (como se muestra en la Figura 4) y se almacena en cámaras de atmósfera controlada. En cualquier caso, una vez que la fruta está lista para ser vendida, se coloca en una línea de selección y se continúa con el proceso siguiente. En primer lugar, se lava la manzana, se seca y se encera. Luego, dependiendo de la tecnología, varía la forma en la que se hace la separación de la manzana por calibre y se guarda en cámaras de almacenamiento convencional, como se puede ver en la Figura 5. Las principales opciones de destino son venta a grandes superficies, venta mayorista o descarte, dependiendo de la calidad y calibre. [9].

Los packing pueden ser o no productores, pero la mayoría de los packing se encuentran gestionados por productores. En general, reciben manzanas de otros productores, así como otras especies de fruta. Se espera que los productores que envían su fruta al packing hayan hecho una clasificación y separación de los descartes previamente, por lo que el mayor descarte se da durante la cosecha. [9].

El contacto entre los productores y los packing es directo. Como explica [9], dependiendo de la relación se puede acordar un precio de compra al momento de enviar la fruta al packing, o a medida que se vende la fruta se le va pagando la parte correspondiente al productor (esta última modalidad es la más común, pero existen otras no relevadas en este estudio). Usualmente se hace una estimación de la fecha en la que puede venderse la fruta a partir de un control de calidad en la cosecha. A raíz de esta información provista por el productor, el packing toma la decisión de hasta cuánto tiempo almacenar la fruta. El almacenamiento se planifica de manera de llegar con manzana almacenada hasta el comienzo de la próxima temporada (aproximadamente enero). Se planifica el almacenamiento considerando una venta consistente entre los meses, pero teniendo en cuenta que en el verano la demanda sube.



Figura 3: Entrada de un packing en Uruguay. Fuente: elaboración propia.



Figura 4: Baño de conservación. Fuente: elaboración propia.



Figura 5: Bins de manzana almacenados en cámara de almacenamiento convencional. Fuente: elaboración propia.

Mayorista

En el segmento mayorista de la cadena de suministro de manzanas en Uruguay, el principal actor es la Unidad Agroalimentaria Metropolitana, UAM por sus siglas (antes Mercado Modelo), que concentra aproximadamente el 52 % del comercio nacional de frutas y hortalizas [23]. Este mercado actúa como un centro de concentración y redistribución de productos agrícolas, proporcionando infraestructura y servicios esenciales para la comercialización de alimentos. Según [23], las tareas realizadas en la UAM incluyen la gestión de la calidad del producto, la facturación y la recaudación, facilitando así la venta y distribución eficiente de, entre otros productos, las manzanas.

La UAM se relaciona principalmente con los productores y los minoristas, actuando como intermediario entre estos actores. Los productores pueden llevar directamente su producción al mercado para que los minoristas adquieran grandes volúmenes para abastecer sus establecimientos.

De acuerdo con [34], la manzana es la tercera fruta más consumida y vendida en la UAM, representando aproximadamente un 8 % del volumen que ingresa al mercado. Cerca de 10 operadores comercializan el 60 % de la manzana vendida, mientras que el restante 40 % es comercializado por una gran cantidad de puestos.

El precio de venta de la manzana está determinado por la relación entre la oferta y la demanda, así como por la información disponible sobre la cosecha del año. Al ser una fruta con mayor capacidad de conservación que otras, el precio de los días previos influye en la negociación. Además, el conocimiento sobre la abundancia de la cosecha y la cantidad de manzanas almacenadas es clave: el precio tiende a bajar si la cosecha fue abundante y a subir si fue escasa. Esto es característico del mercado uruguayo, ya que se trata de un mercado cerrado y protegido, donde la mayor parte del consumo es interno. [34].

En la UAM se relevan los valores y precios de venta, y se publica esta información como referencia, sin incidir en la fijación de los mismos. El precio de referencia no solo se utiliza a nivel de la UAM, sino que también es un precio de referencia a nivel nacional, aplicable a todos los compradores y vendedores de manzanas. Este precio varía según la variedad de

manzana, el calibre (chico, con diámetro menor a 68 mm; mediano, con diámetro entre 68 y 72 mm; y grande, con diámetro mayor a 72 mm [28]) y la calidad (E, I o II), de acuerdo con ciertas especificaciones técnicas establecidas. [34] menciona que la principal limitación para los operadores es la capacidad de colocación: es decir, la cantidad de demanda y capacidad de comercialización. Algunos operadores tienen mayor peso que otros porque su capacidad de colocación es mayor, tienen varios clientes y una gran diversidad de los mismos (compradores del interior, feriantes, supermercados, entre otros).

En cuanto a la diversidad de compradores, se nombraron clientes como distribuidores, feriantes y supermercados, los cuales corresponden a clientes de todo el país y conforman el número global de compradores, cercano a 3.500. Cada uno de estos compradores tiene diferentes criterios y estándares de calidad de la fruta, dependiendo de su grado de especialización y de los consumidores finales. [34]

Grandes superficies

Las grandes superficies (supermercados) constituyen un eslabón importante en la cadena de suministro de manzanas, ya que compran grandes volúmenes de productos directamente a los productores. Su considerable poder de negociación les permite imponer altos estándares de calidad para los productos que adquieren. Los supermercados operan centros logísticos que les permiten manejar eficientemente el flujo de productos hacia sus sucursales, asegurando un suministro constante y de alta calidad para sus clientes. [41]

Los supermercados establecen contratos directos con productores, comprometiéndolos a proveer un volumen determinado de manzanas bajo criterios exigentes de calidad. Tienen preferencia por proveedores que puedan cumplir con sus estrictas demandas, lo cual contribuye a una mayor concentración de la producción entre un número menor de productores más grandes y especializados. Según [41], los supermercados imponen restricciones sobre la variedad, el calibre, el grado de maduración, la vida útil del producto, la coloración y el aspecto físico. Si la calidad no cumple con estos estándares, los supermercados pueden rechazar el producto o exigir cambios al proveedor.

Minorista

Los minoristas, como almacenes, autoservicios y ferias urbanas, representan el último eslabón en la cadena de comercialización de manzanas en Uruguay, vendiendo directamente al consumidor final. Estos establecimientos generalmente compran sus productos en mercados mayoristas como la UAM y desempeñan un papel crucial en hacer accesibles las manzanas a los consumidores finales, especialmente en áreas urbanas.

La relación de los minoristas con otros actores de la cadena es directa, manteniendo vínculos principalmente con los mayoristas y, en algunos casos, con los productores. Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los minoristas se abastecen en los mercados mayoristas debido a sus limitados volúmenes de compra, lo que les da poco poder de negociación individual. Sin embargo, la agrupación en cooperativas o asociaciones busca mejorar su capacidad de negociación y reducir costos.

3.3. Pérdidas de manzana en Uruguay

En Uruguay, se han llevado a cabo diversos estudios para estimar las pérdidas a lo largo de las cadenas de suministro de distintos alimentos, con el propósito de identificar sus causas y cuantificarlas, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. En este contexto, resultan particularmente relevantes los estudios enfocados en el relevamiento y análisis de las pérdidas de manzanas a lo largo de su cadena de suministro, los cuales aportan información clave para esta investigación.

Según el informe [7] sobre el análisis de las pérdidas de manzanas a lo largo de la cadena de suministro y sus diversas causas, se estima que las pérdidas ponderadas pueden llegar a representar hasta un 18 % de la fruta almacenada. Esta cifra fue estimada a partir del cálculo de las pérdidas en los distintos eslabones de la cadena, específicamente: precosecha, cosecha,

almacenamiento y comercialización en el mercado mayorista. Quedan por fuera de este estudio la cuantificación y análisis de causa de pérdidas en las etapas minoristas y de consumo.

De acuerdo con los datos relevados en este informe, las pérdidas en la precosecha, dadas por la caída del fruto del árbol, fluctúan entre un 5 % y 10 % de la cantidad total de manzanas en el árbol, sin considerar eventos climáticos extremos que afecten la producción, como lo pueden ser granizo o heladas. Al momento de la cosecha se producen pérdidas de entre un 5 % y 10 % de la cantidad total de manzanas en el árbol, siendo las principales causas según [7], la “presencia de zonas hundidas, textura tipo “corcho”, fruta picada, con hongos, fruta muy chica con peso menor a 110 gramos (bajo calibre), o fruta en estado de descomposición”, como se puede ver en la Figura 6. La fruta perdida en esta etapa tiene como destino la alimentación animal, o la industria (sidrería, jugueras, membrillo) si se detecta en la época de cosecha. [7].



Figura 6: Manzanas separadas para descarte. Fuente: elaboración propia.

Una vez finalizado el proceso de cosecha, la fruta atraviesa un proceso de tratamiento previo a su almacenamiento, ya sea en cámara de atmósfera controlada o cámara convencional. Al salir del almacenamiento, y previo a su envasado, la fruta pasa por una línea de clasificación y selección, en la cual se descartan las manzanas dañadas y se mantienen las que están en buen estado, como se puede ver en la Figura 7. En este proceso, las principales causas por las que se descartan las frutas son por criterios de tamaño, color y condición externa, y los principales defectos presentados son “daños por golpe y desórdenes fisiológicos”. Estos últimos se originan por factores ambientales durante el proceso de crecimiento del fruto y el almacenamiento. Parte de la fruta desechada en esta etapa podría haber sido identificada en la etapa previa, ahorrando costos durante el proceso. En esta etapa, las pérdidas en volumen varían entre un 3 % y un 20 %, y los principales destinos de la fruta descartada son la industria y la alimentación animal. [7].

Finalmente, la etapa final relevada en [7] corresponde a la comercialización en el mercado mayorista. En esta instancia, las pérdidas oscilan entre un 0,5 % y un 1 %, siendo atribuibles a diversas causas como golpes en la fruta, daños derivados de la falta de refrigeración, condiciones



Figura 7: Manzanas almacenadas para la venta. Fuente: elaboración propia.

inadecuadas de conservación y fluctuaciones en el comportamiento de la demanda. Parte de las pérdidas en esta etapa son recuperadas por Redalco, una organización que busca prevenir el desperdicio de frutas y verduras, rescatando parte de las pérdidas que no pudieron ser vendidas pero están en condiciones de consumo. En cuanto a la recuperación de la manzana, el informe realizado estima que Redalco recupera un 0,1 % de las pérdidas y el resto se dispone como materia orgánica. [34] complementó esta información destacando que, además de Redalco, el plan ABC de la Intendencia de Montevideo recupera un 20 % de las pérdidas. Los datos expuestos en el estudio se muestran en el diagrama de la Figura 8, presentándose en relación a los ingresos de cada etapa.

Según [34] no hay una estimación específica acerca de las pérdidas de manzana. Los residuos totales por mes en la UAM son 350 toneladas, lo cual representa aproximadamente el 1 % de lo que ingresa. De estas pérdidas, hay un 20 % que se recupera para alimentación: tanto a partir del programa ABC de la Intendencia de Montevideo, como por Redalco. Otro 16 % es utilizado como compostaje, y el restante 64 % es descartado. Para la minimización de las pérdidas, [34] menciona que los operadores grandes cuentan con cámaras en la UAM, de manera de poder conservar la fruta de un día al otro. Los operadores más pequeños suelen optar por llevarse la fruta de nuevo a conservación y volver a llevarla al día siguiente. Esto aumenta la manipulación de la misma, habiendo una mayor probabilidad de deterioro por golpes.

En el estudio [7] se concluye que los puntos críticos de pérdidas identificados son “el daño por golpe y el daño por desórdenes fisiológicos, que ocurren en las primeras etapas y se manifiestan en el packing (luego de un almacenamiento que en muchos casos es de varios meses)”. Esto no solo es problemático en cuanto a las pérdidas, sino que la pérdida se da posterior a la causa, a lo largo de la cadena, cuando ese producto tiene mayor valor agregado y un mayor costo asociado. Las principales causas identificadas en el estudio son la inadecuada gestión de procesos en la etapa de precosecha y poscosecha, reflejada principalmente en la falta de estandarización

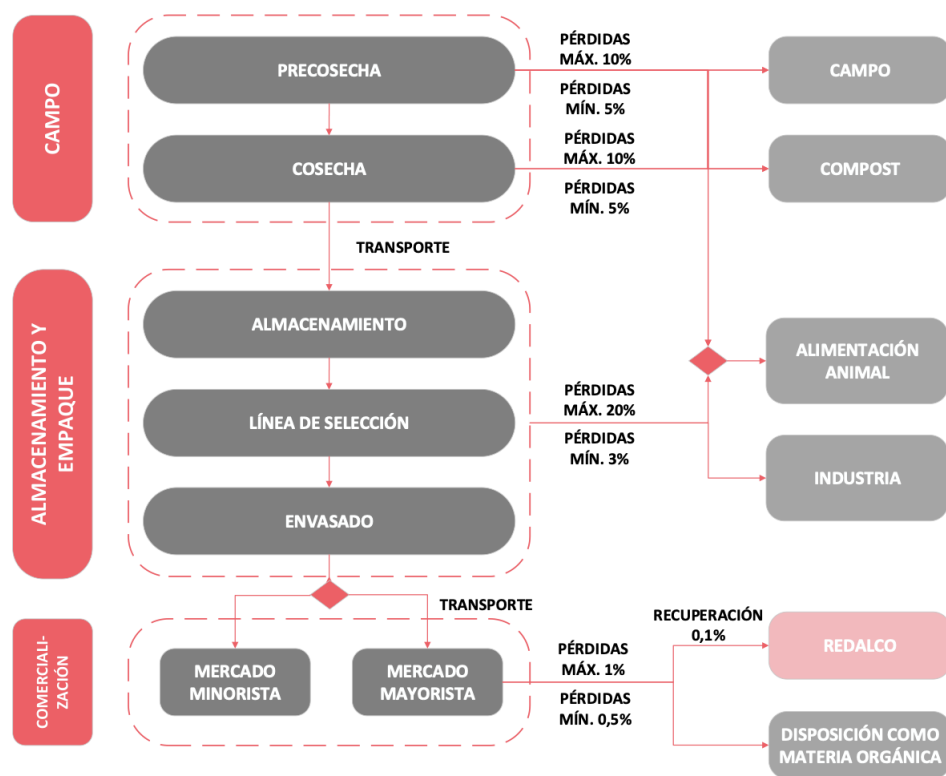


Figura 8: Etapas del proceso y porcentaje de pérdidas sobre el total de ingreso a cada etapa de acuerdo con [7].

de procesos de cosecha y selección de fruta; la dificultad de gestionar recursos humanos y el ineficiente monitoreo del cultivo por parte del productor.

En un estudio posterior [8], se estudian en detalle las pérdidas y desperdicio generados en un packing, visto que del estudio anterior ([7]) se desprende que el principal punto crítico de pérdidas es el almacenamiento y empaque. En este, se analizaron únicamente dos variedades de manzana: Red Delicious (RD) y Cripps Pink (CP). Se determinó que las manzanas no aptas para comercialización detectadas a la salida de la cámara de atmósfera controlada fueron entre un 2 % y 9 %. Las causas de las pérdidas fueron diferenciadas según la variedad, donde según [8]: “las principales causas fueron para RD desórdenes fisiológicos (35 %), defectos por hongos (26 %), defectos por golpe (25 %), insectos (10 %) y para CP defectos por hongos (43 %), defectos por golpe (34 %), desórdenes fisiológicos (10 %), insectos (9 %)”. Como fue mencionado previamente, muchos de estos defectos fueron ocasionados en las etapas de precosecha y poscosecha, pero se manifestaron o identificaron en esta etapa posterior. El resumen de este informe se presenta en la Figura 9.

Según [30], [9] y [18], la principal causa de pérdidas en el packing se debe a calibres no vendibles (ya sean demasiado chicos o demasiado grandes). Estas pérdidas son aproximadamente un 10 % de la fruta almacenada. Si se trata de los meses de cosecha, estas manzanas se pueden enviar a jugueras o sidrerías (aunque la ganancia obtenida es prácticamente nula, permite compensar los costos de producción asociados), pero si ocurren en meses posteriores, la pérdida es total y va a consumo animal, lo cual no genera ninguna ganancia.

Según [36], las pérdidas de manzanas pueden atribuirse a cuatro causas principales: reducción de la productividad, eventos climáticos extremos, agentes patógenos y desórdenes fisiológicos. La productividad, en particular, está estrechamente vinculada a factores climáticos como sequías, granizo o vientos extremos, además de las técnicas y condiciones de cultivo utilizadas. Estas causas constituyen la mayor proporción de las pérdidas totales y se concentran en la etapa de

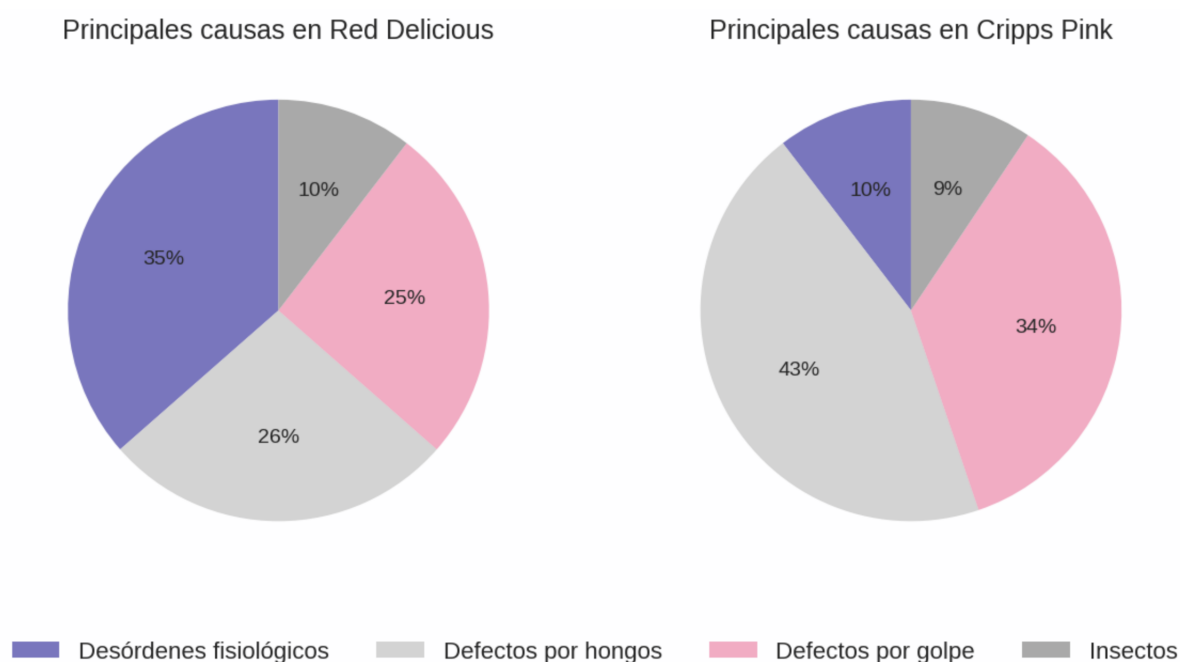


Figura 9: Principales defectos para las variedades Red Delicious y Cripps Pink según [8].

precosecha. En menor medida, se producen pérdidas ocasionadas por agentes patógenos, como plagas y enfermedades, las cuales son controlables y, de ser gestionadas adecuadamente, pueden no impactar significativamente la producción. Por último, los desórdenes fisiológicos, derivados de condiciones del cultivo tales como aspectos nutricionales, atmosféricos y de exposición solar, también pueden ser mitigados con medidas preventivas. No obstante, tanto los agentes patógenos como los desórdenes fisiológicos generan efectos que no se limitan a la etapa de cosecha. Estas pérdidas persisten a lo largo de los eslabones posteriores, como el packing y la comercialización, debido a que no siempre son completamente detectadas durante la cosecha, en concordancia con lo indicado en los informes previamente mencionados.

Según se explica en un artículo sobre la productividad de las manzanas y sus condiciones [19], el máximo potencial de productividad requiere tomar decisiones acerca de todos los factores determinantes del rendimiento: “la población de plantas, el suministro y equilibrio de nutrientes, y la protección contra las pérdidas provocadas por insectos, malezas y enfermedades”. Sin embargo, este rendimiento será limitado por factores incontrolables, como son “la radiación solar, la temperatura, el dióxido de carbono atmosférico y las características genéticas de cada variedad” ([19]). De acuerdo con [36], la productividad esperada de las manzanas, en un clima favorable, es del entorno de las 100.000 toneladas anuales. Sin embargo, debido a factores climáticos desfavorables en nuestro país la producción óptima es de 50.000 toneladas anuales, lo cual es una pérdida importante del potencial de este cultivo. Además, la producción promedio anual es de 20.000 toneladas anuales, siendo esta una gran causa de pérdidas “potenciales”.

De acuerdo con [17], en un estudio sobre los desórdenes fisiológicos y problemas más comunes observados durante el almacenamiento de ciertas frutas, dentro de las cuales está incluida la manzana, ésta se ve dañada por desórdenes fisiológicos y otro tipo de enfermedades en esta etapa de la cadena. Los desórdenes fisiológicos pueden ser expuestos durante la precosecha, con síntomas en el árbol, o en la poscosecha, manifestándose días, semanas o meses luego de ocurrida la causa, ya sea durante el transporte o el almacenamiento.

Las principales causas de los desórdenes fisiológicos, según se menciona en el estudio, pueden ser: nutricionales (deficiencia en minerales), de temperatura (temperaturas incorrectas durante

la precosecha y cosecha, o durante el almacenamiento), desórdenes respiratorios (relacionados con las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono), y la madurez de la fruta al momento de la cosecha. Todas las causas antes mencionadas podrían ser mitigadas a lo largo de la cadena de suministro de las manzanas, a través de acciones de diversos actores, pero principalmente productores y responsables de los establecimientos de almacenamiento y packing.

Dentro de las conclusiones del informe, [17] menciona que: “la susceptibilidad a los distintos desórdenes fisiológicos depende del cultivo y de la variedad” [17]. Este es un punto importante y concuerda con las conclusiones del estudio, en el que se diferencian los principales defectos según la variedad.

En un estudio previo, [16] investiga la relación entre el momento de cosecha de la manzana y los desórdenes fisiológicos que puede desarrollar posteriormente, en especial durante el almacenamiento y la comercialización. Además, presenta diferentes indicadores para determinar la condición óptima de cosecha, así como condiciones de muestreo. Menciona que los desórdenes fisiológicos causados por un mal punto de cosecha no se evidencian en el árbol, sino que en la etapa de almacenamiento o comercialización, cuando ya avanzaron por etapas de la cadena, implicando mayor costo asociado.

Dado que los desórdenes fisiológicos generan diferentes impactos sobre el producto final, dependiendo del nivel de maduración de la fruta al momento de la cosecha, [16] indica que una buena práctica es comercializar inmediatamente las primeras y últimas manzanas cosechadas. Además, si se trata de frutas que van a estar almacenadas por períodos de hasta siete meses, el estado de madurez de la cosecha se vuelve un punto crítico para disminuir las pérdidas en etapas tardías (almacenamiento y comercialización).

Las causas de pérdidas mencionadas se tienen en cuenta a nivel gubernamental, en la estrategia nacional de Prevención y Reducción de las Pérdidas y Desperdicios de Alimentos [29]. Las causas raíz identificadas en dicha estrategia son: la existencia de plantaciones antiguas de manzanas, en cuanto a su organización, métodos, técnicas y las variedades de manzanas plantadas; dificultades en la gestión de la plantación, en lo que refiere al personal, métodos, control y monitoreo; la evaluación de la calidad de las manzanas al momento de ingresar a las cámaras de almacenamiento; los criterios de calidad de los puntos de venta (en especial supermercados), los cuales priorizan la estética por sobre el valor nutricional del alimento; y los métodos de transporte, tanto por falta de refrigeración como por condiciones no adecuadas que aumentan la cantidad e impacto de los golpes que sufren las manzanas.

Esto último está alineado con [34], donde se mencionan dos oportunidades de mejora principales para reducir las pérdidas a nivel del mercado mayorista. En primer lugar, el transporte no es refrigerado, lo cual no ayuda a la conservación de la fruta. Este es un factor cuya posibilidad de mejora depende de la época del año siendo más crítico en verano que en estaciones frías. La segunda oportunidad de mejora refiere a la manipulación de la fruta. No hay estándares de manipulación, y no hay registro de los golpes que sufre la fruta. Esto es especialmente importante en términos estéticos, dado que los consumidores tienden a valorar este factor por sobre el aporte nutricional y las condiciones adecuadas para su consumo.

Parte de la estrategia propuesta, según [29], para reducir las pérdidas consiste en cuantificar su impacto económico para los productores, destacando cómo estas afectan directamente la viabilidad y rentabilidad de su negocio. Esto se debe a que la mayoría de las decisiones orientadas a reducir las pérdidas se toman a nivel del productor, especialmente en lo referente al proceso de cultivo, así como al tratamiento y selección de la fruta antes de su ingreso a las etapas de almacenamiento. Entre las medidas planteadas para reducir las pérdidas de manzanas se incluyen: la erradicación y renovación de montes frutales que se han vuelto improductivos, el fortalecimiento de capacitaciones en buenas prácticas de manipulación de la fruta, la mejora en la planificación del almacenamiento y conservación, la educación de los consumidores sobre la priorización del valor nutricional por encima de la apariencia estética, el fortalecimiento del Registro Nacional Frutihortícola y del registro de packing y cámaras de frío de DIGEGRA, y

la implementación de mecanismos para medir las pérdidas de fruta en el mercado mayorista, comenzando desde la UAM.

Desde el punto de vista agronómico, [36] mencionó manejos para maximizar el rendimiento y calidad de las manzanas, y así reducir las pérdidas. Los principales métodos destacados fueron manejos acerca de los requerimientos de frío invernal, polinización y fundamentalmente el riego, el cual destacó como “la medida de manejo por excelencia que tiene mayor impacto en la productividad”, así como el raleo, que busca equilibrar la producción y calidad de la fruta. Resaltó la importancia de encontrar el equilibrio en el raleo, donde la pérdida por la fruta raleada se justifica a partir de la mejora del calibre.

3.4. Modelado matemático multiobjetivo

Como fue previamente mencionado, la contraposición de objetivos y necesidades es frecuente entre los diferentes actores de la cadena de suministro. Esto hace evidente la necesidad de manejar el modelado de la cadena como un problema de toma de decisiones multiobjetivo (conocido en la literatura como MCDM por sus siglas en inglés para Multi Criteria Decision Making).

Si bien la resolución de problemas multiobjetivo tiene múltiples enfoques, la raíz de estos está en convertir el problema de optimización multiobjetivo en uno de optimización de un único objetivo para su resolución. La forma en la que se transforma el problema multiobjetivo a uno simple es lo que diferencia a los distintos métodos de resolución. Para garantizar la máxima flexibilidad en el enfoque adoptado para el desarrollo del modelo matemático, su implementación se llevará a cabo mediante la obtención de la “Frontera de Pareto” utilizando el método “ ϵ -constraint”. Se tomó la fuente [5] como base teórica para la resolución del modelado multiobjetivo expuesto a continuación.

3.4.1. Frontera de Pareto

Dado un problema general de optimización múltiple (MOP) se puede escribir de la siguiente manera:

$$\text{mín } f(x)$$

sujeeto a

$$x \in X$$

donde $X \subseteq \mathbb{R}^n$ es un conjunto no vacío y $f(x) = (f_1, f_2, \dots, f_k)^T : X \rightarrow \mathbb{R}^k$ es una función vectorial. Un punto $x^* \in X$ es *óptimo de Pareto* (también llamado *eficiente* o *no dominado*) si y solo si no existe otro punto $x \in X$ tal que $f(x) \leq f(x^*)$ y $f_i(x) < f_i(x^*)$ para al menos una función objetivo f_i . [5]. Todas estas soluciones tienen la propiedad de que no es posible encontrar otro punto que mejore uno de los objetivos sin empeorar al menos uno de los otros. El conjunto de estas soluciones se conoce como frente o frontera de Pareto. En el caso del problema presentado en la Figura 10, la frontera de Pareto está formada por el conjunto de puntos señalados en rosado.

En la Figura 10, el punto (a) es el óptimo de la función objetivo f_2 , asociado a un valor de la función objetivo f_1 . El punto (b) minimiza f_1 , con un valor dado de f_2 . Para un punto de la frontera de Pareto, como (c), cualquier intento de mejorar un objetivo implica empeorar el otro. Los cuadrados son otras soluciones posibles, peores en términos del compromiso entre ambas funciones que las del conjunto de Pareto. A estas soluciones se les llama soluciones dominadas, dado que existen otras soluciones que mejoran uno de los objetivos sin empeorar los otros.

Una de las características más atractivas de la construcción de la frontera de Pareto es que permite analizar distintas combinaciones de priorización entre las funciones objetivo. Esto da la flexibilidad para analizar cuánto pueden optimizarse los valores de las funciones de forma

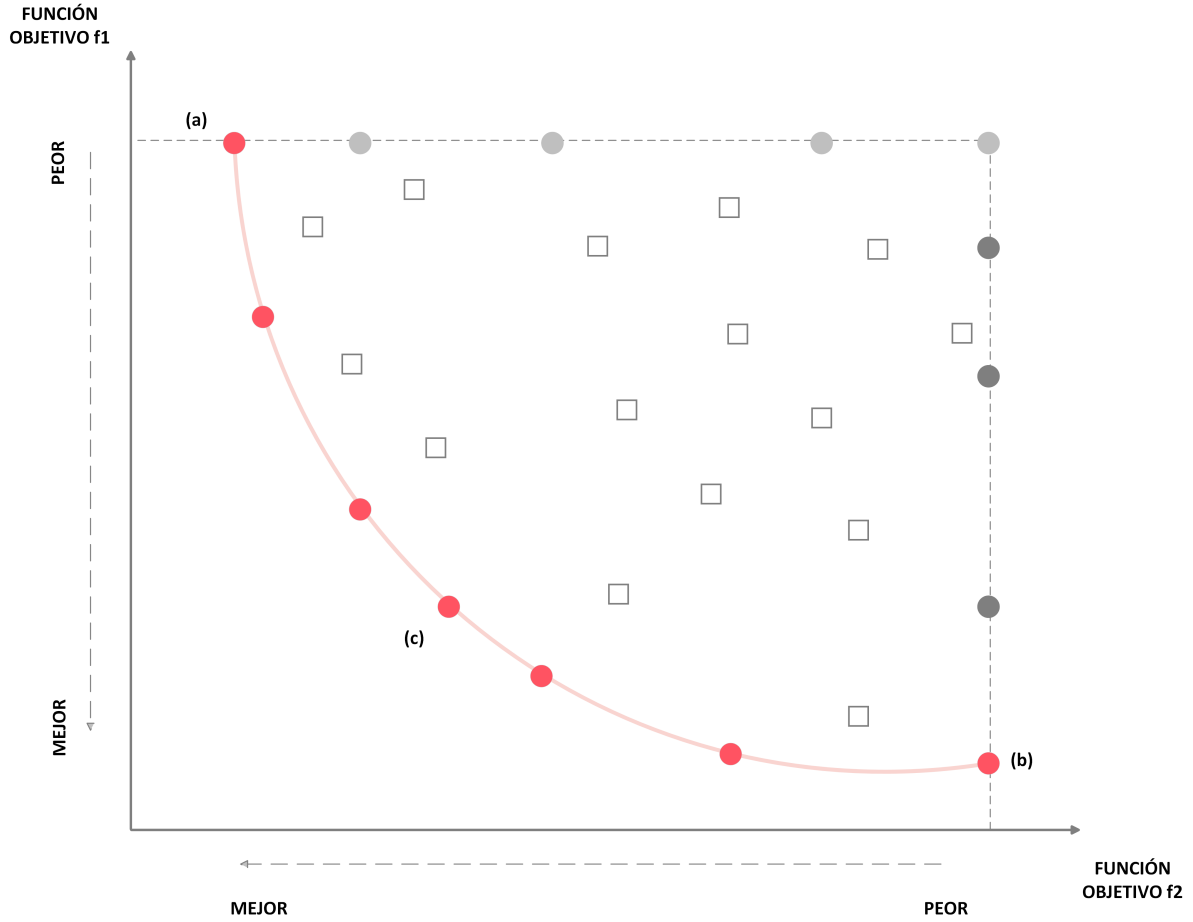


Figura 10: Ejemplo de frontera de Pareto de acuerdo con [3].

individual en función de los pesos relativos que se le dé a los objetivos correspondientes. A diferencia de los métodos que asignan ponderaciones a priori a las funciones objetivo, que pueden llevar a la obtención de resultados sesgados y conclusiones válidas parcialmente, el análisis de la frontera de Pareto da más claridad sobre los resultados, ofreciendo mayor transparencia y versatilidad para la interpretación de los mismos.

3.4.2. Metodología de construcción de la frontera de Pareto

La metodología seleccionada para la construcción de la frontera de Pareto fue propuesta en [3] pero se presenta de forma resumida a continuación, con las adaptaciones realizadas para adecuarlo al presente estudio.

A continuación se presenta un método para generar la frontera de Pareto, cuya estructura se ilustra en la Figura 12. Primero, se toma en consideración solo la primera función objetivo y haciendo uso de un solver de programación lineal, se obtiene una solución óptima, cuyo valor se considera como límite inferior LI_1 de la primera función objetivo.

Luego se toma en consideración únicamente la segunda función objetivo, imponiendo la ecuación 1 como una restricción para la ejecución con el solver. Se va a encontrar el valor óptimo de la segunda función objetivo considerando el valor de la primera función objetivo igual a LI_1 .

$$\text{Función objetivo } f_1 = LI_1 \quad (1)$$

De esta manera, se puede optimizar la segunda función objetivo sin sacrificar la primera. Así, se obtiene una solución cuyo valor se considera el límite superior LS_2 de la segunda función objetivo. De esta forma, el punto T_1 con los valores de las funciones objetivo (LI_1, LS_2) es un punto límite del frente de Pareto. De la misma manera, se repite este procedimiento cambiando el orden de las dos funciones objetivo, obteniendo así el límite inferior LI_2 de la segunda función objetivo, el límite superior LS_1 de la primera función objetivo y un segundo punto de la frontera T_2 con los valores de las funciones objetivo (LS_1, LI_2) antes hallados.

Con estos valores, es posible calcular la diferencia D_1 entre LI_1 y LS_1 y haciendo uso de la ecuación 2 como una restricción, se relaja el valor de LI_1 en un cierto porcentaje. Para cada valor de $n = 1 \dots 9$, se está optimizando la segunda función objetivo, lo que permite obtener un conjunto S_1 de 9 soluciones.

$$\text{Función objetivo } f_1 \leq LI_1 + 10\% \times n \times D_1 \quad (n = 1 \dots 9) \quad (2)$$

Análogamente, se calcula la diferencia D_2 entre LI_2 y LS_2 e imponiendo la ecuación 3 como una restricción, se consigue relajar LI_2 en un cierto porcentaje. Para cada $n = 1 \dots 9$, se optimiza la primera función objetivo, obteniendo un conjunto S_2 de 9 soluciones.

$$\text{Función objetivo } f_2 \leq LI_2 + 10\% \times n \times D_2 \quad (n = 1 \dots 9) \quad (3)$$

Finalmente, se superponen los dos conjuntos S_1 y S_2 , eliminando las soluciones dominadas por otras soluciones. Así, al juntar el conjunto de resultados y los dos puntos extremos T_1 y T_2 se obtiene un conjunto de puntos que pertenecen a la frontera de Pareto, como se muestra a continuación en la Figura 11.

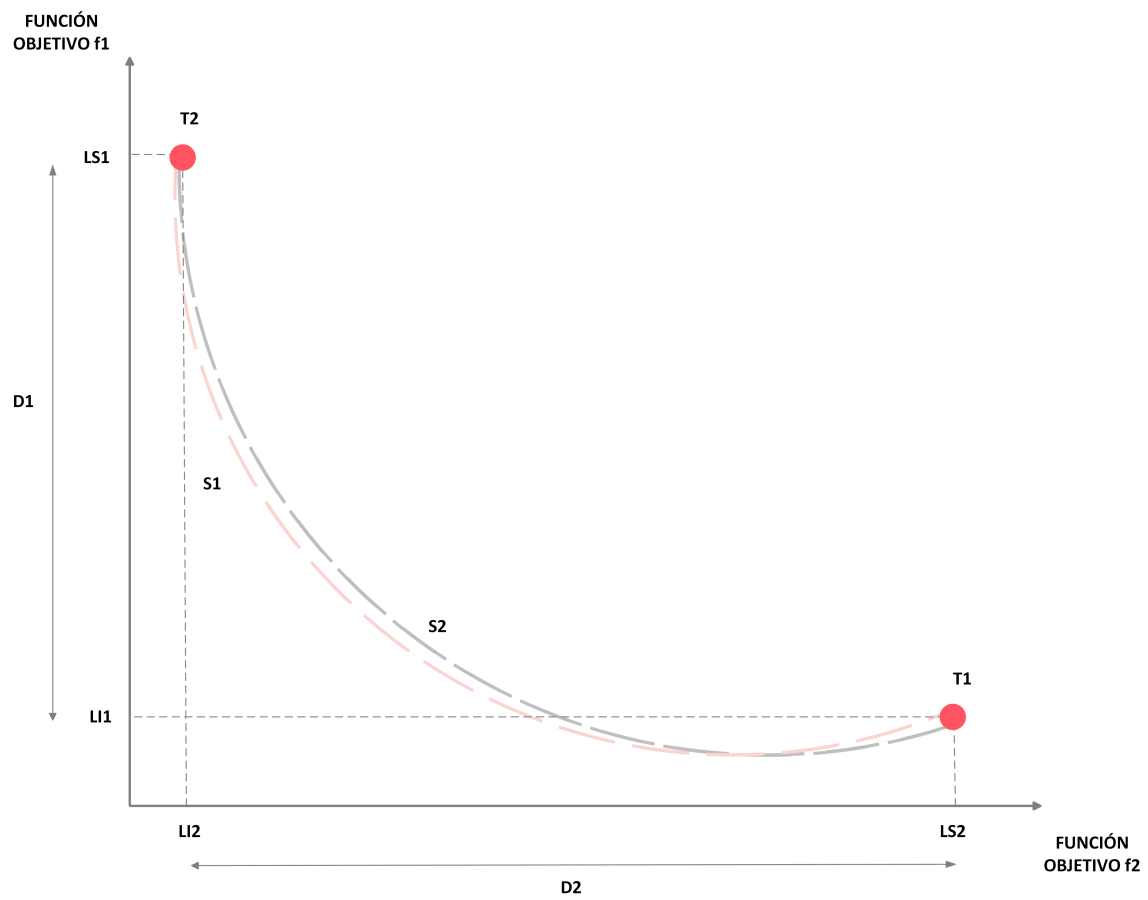


Figura 11: Ejemplo de frontera de Pareto obtenida a través del método propuesto, de acuerdo con [3]

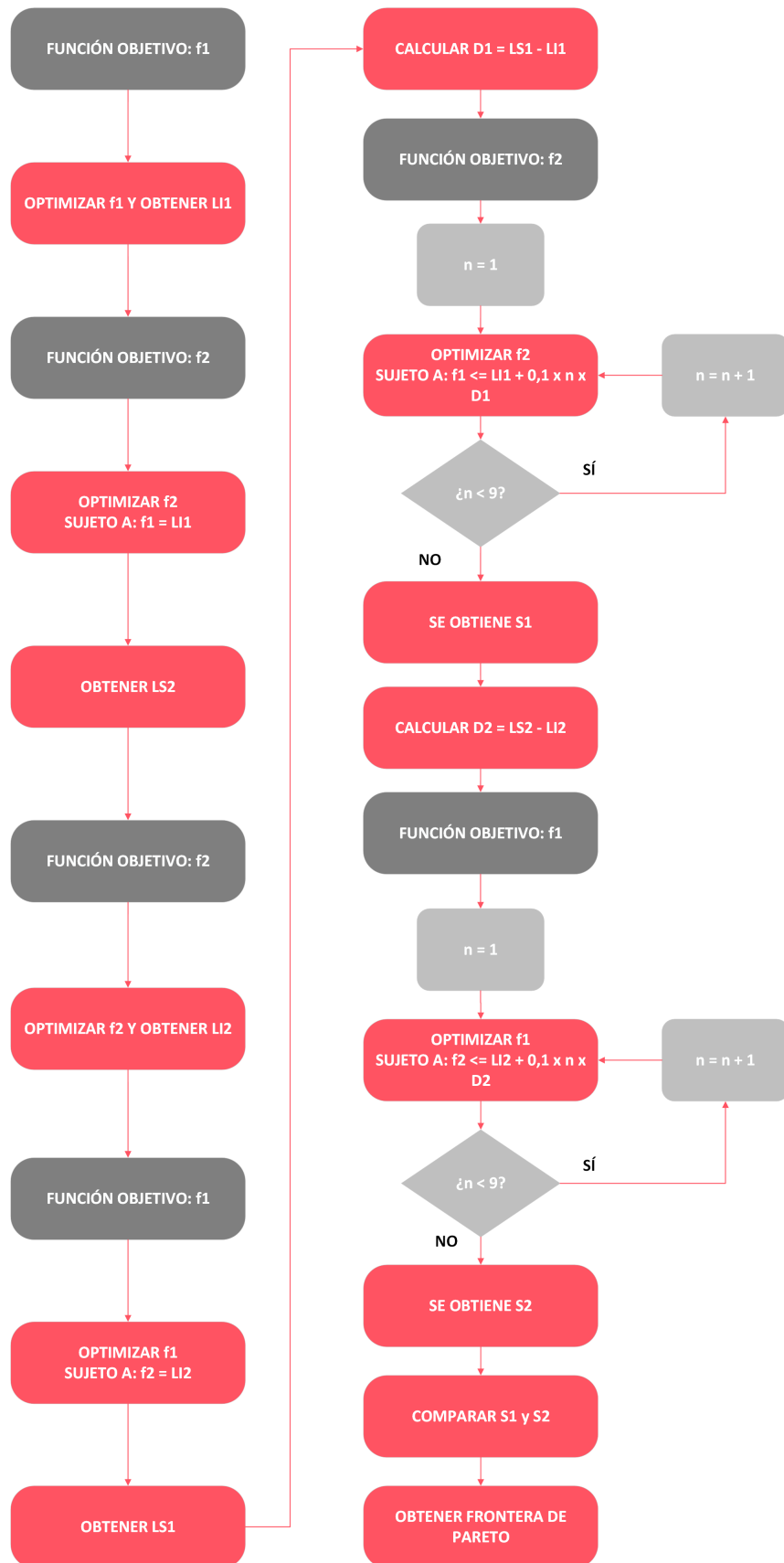


Figura 12: Diagrama de flujo de la metodología para la construcción de la frontera de Pareto de acuerdo con [3].

4. Descripción del problema

En esta sección se describe el problema a estudiar y se presentan los elementos que fundamentarán el diseño del modelo matemático. El alcance del caso de estudio abordado es presentado en la sección 4.1.

El objetivo es desarrollar una estrategia de planificación que abarque las decisiones tomadas por el productor y el packing, con el objetivo de minimizar las pérdidas de manzana y, al mismo tiempo, maximizar el margen económico. Dicha estrategia queda definida por las decisiones del almacenamiento y venta de las distintas variedades de manzanas, cumpliendo siempre con los estándares de calidad exigidos por los clientes y considerando las fluctuaciones en los precios de venta sujetos a la calidad de la manzana a lo largo del año. El packing considerado en el modelo dispone de cámaras de almacenamiento convencional y de atmósfera controlada, que permiten conservar las manzanas por distintos períodos. La calidad disminuye conforme aumenta el tiempo de almacenamiento, mientras que el precio también fluctúa según la temporada. Esto último permite al packing vender las manzanas a mayores precios en períodos donde esta incrementa su valor en el mercado, aunque también conlleva el riesgo de pérdida de calidad por almacenamientos prolongados y mayores costos asociados.

4.1. Definición del alcance

El alcance de este caso de estudio abarca los eslabones de la cadena de suministro que involucran al packing y al productor, como se ilustra en la zona sombreada en la Figura 14. Por lo tanto, la toma de decisiones del modelo debe responder a necesidades, actividades y operaciones que típicamente realizan estos eslabones. Sin embargo, también se consideraron las relaciones con otros actores de la cadena, como mayoristas y supermercados, dado que impactan la toma de decisiones del packing y del productor.

En lo que refiere al productor, no se tomarán en cuenta decisiones sobre el manejo del monte debido a su fuerte componente agronómico, pero sí se considerará la inversión en mano de obra para la cosecha, ya que afecta directamente el costo y la calidad de la fruta resultante. Las decisiones a tomar refieren a la elección entre diferentes niveles de inversión en mano de obra y capacitación, teniendo en cuenta cómo esto influye en la generación de pérdidas a lo largo del proceso productivo. La mano de obra se asume constante y homogénea en su nivel de capacitación.

A nivel de packing, se considerarán decisiones relativas al tiempo y volumen de almacenamiento, distinguiendo entre dos tipos de cámara: almacenamiento en cámaras de atmósfera controlada y cámara de almacenamiento convencional. Para la comercialización, se diferenciarán dos tipos de clientes: el mercado mayorista y las grandes superficies (supermercados). No se considerará la ganancia económica derivada de destinar fruta a la industria, debido a que su volumen y precio son despreciables en comparación con las ventas a los clientes mencionados.

El alcance geográfico de este estudio se limita a los departamentos de Montevideo y Canelones, que son los principales centros de producción y demanda a nivel nacional, excluyendo la comercialización hacia el interior del país. Asimismo, no se considerarán las importaciones ni exportaciones, dado que, debido al elevado volumen de producción nacional de manzanas, estos eventos son excepcionales y suelen estar condicionados por circunstancias climáticas específicas [18]. Además, la exportación se ha vuelto más costosa y escasa debido a la dificultad de competir con los productores del hemisferio norte, quienes cuentan con una mayor capacidad de almacenamiento y conservación de manzanas [42].

Debido a la aleatoriedad intrínseca a los fenómenos climáticos, no se consideran las pérdidas por este factor, y se parte de la cantidad de manzanas disponibles tras la cosecha. Además, se excluyen costos de plantación y cultivo, tratándolos como fijos para la cantidad de árboles dada. La cantidad de manzanos por variedad se define como un parámetro del modelo, ya que

corresponde a una decisión estratégica, mientras que las decisiones contempladas en el modelo son de carácter operativo.

Se asume que todos los bins en cámaras de atmósfera controlada de una misma variedad de manzana comparten la misma distribución de calibres y que, al abrir una cámara, todos los lotes que se encuentran en esa cámara se trasladan al almacenamiento convencional. No se contemplan las eventuales devoluciones realizadas por los clientes y la demanda no se diferencia por calibres.

El horizonte temporal del análisis será de un ciclo productivo de 12 meses, permitiendo una evaluación exhaustiva del ciclo de producción y venta de manzanas. Se considerarán los grupos de variedades más predominantes en el mercado: Red, Cripps Pink y Gala, que representan el 83 % de la producción nacional según datos de la UAM [39], como se puede ver en la Figura 13. El enfoque del proyecto será la creación de un modelo matemático para minimizar la generación de pérdidas y maximizar el margen económico reportado, optimizando parte de la cadena de suministro y mejorando su eficiencia.

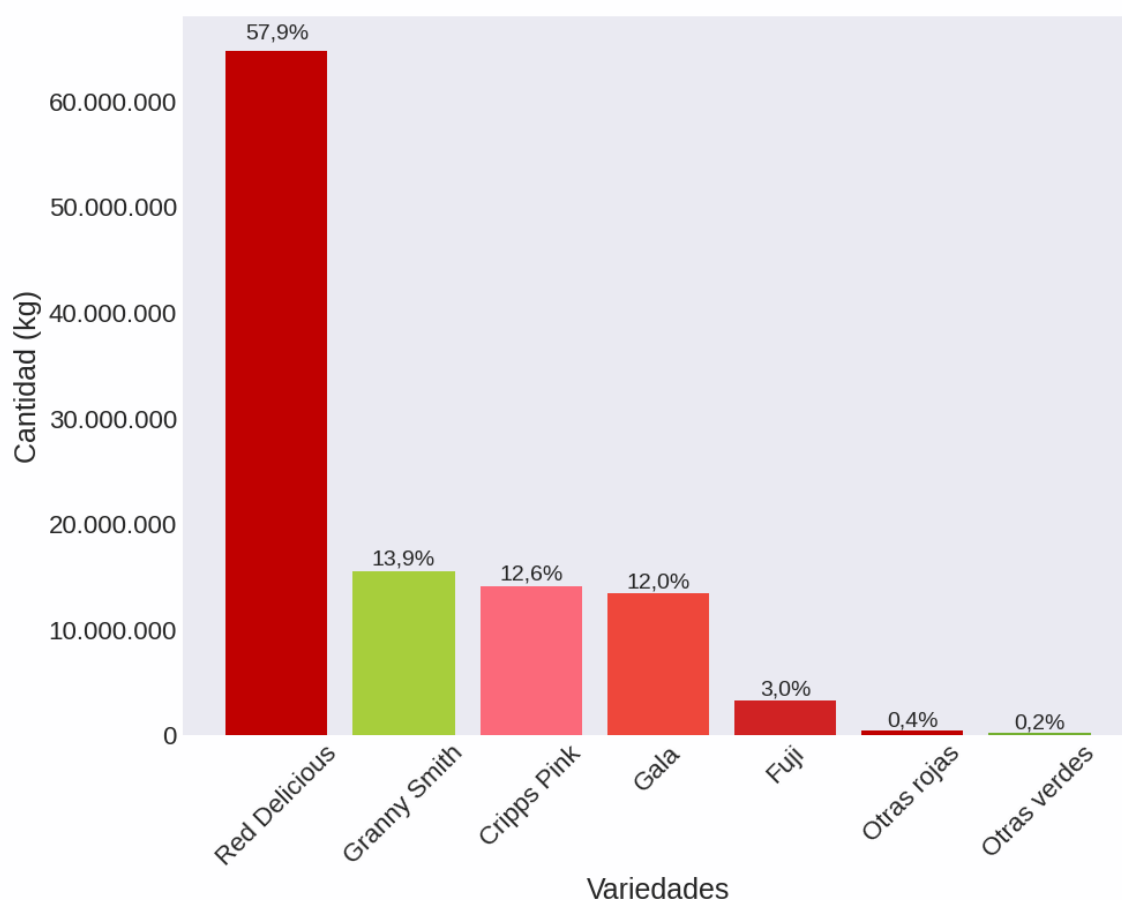


Figura 13: Distribución de la cantidad de manzanas clasificadas por variedad según los ingresos al Mercado Modelo-UAM entre 2019 y 2023. Fuente: elaboración propia basada en [39]

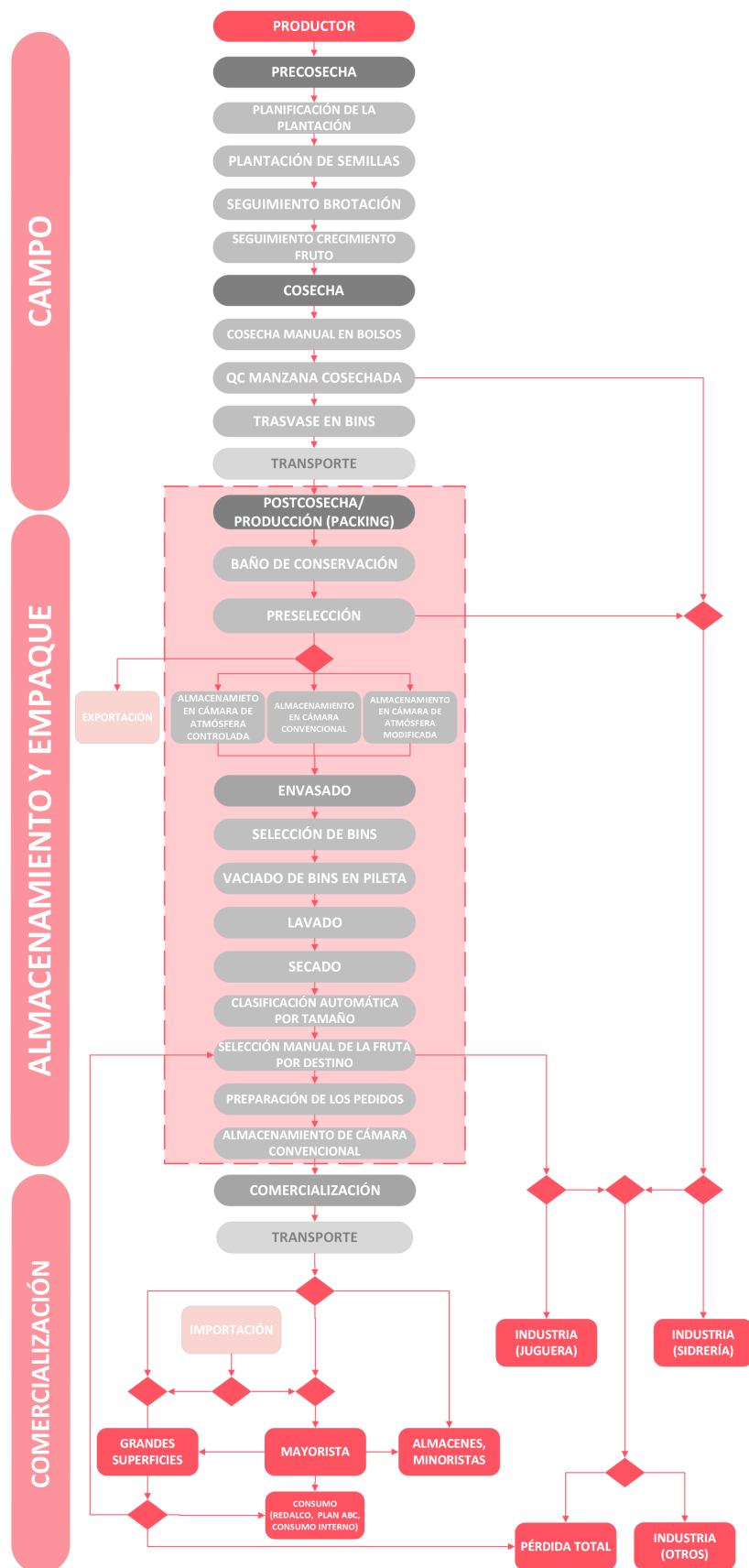


Figura 14: Diagrama de alcance del proyecto. Fuente: elaboración propia.

5. Modelado matemático

En el presente capítulo se presenta el desarrollo del modelo matemático elaborado. En la primera sección 5.1 se describe el modelo matemático, presentando las hipótesis realizadas para su diseño, los conjuntos, parámetros, variables de decisión, restricciones y funciones objetivo. En la segunda sección 5.2 se presenta la formulación completa del modelo integrado.

Previo a la elaboración del modelo, se realizó una revisión bibliográfica de modelos matemáticos relacionados con la temática a abordar, con un enfoque particular en problemas de optimización multiobjetivo, cadenas logísticas, minimización de pérdidas y cadenas de suministro de alimentos perecederos. Estas fuentes, referenciadas como [43], [3], [31], [4], [33], [20], [22], [40], [11] y [32], sirvieron como base para adoptar ideas relevantes que permitieran modelar de manera adecuada el problema específico planteado en este estudio.

5.1. Descripción del modelo matemático

En esta sección se describe el modelo matemático elaborado para abordar el problema de estudio, en el que se busca minimizar las pérdidas de manzanas generadas durante la cosecha y posteriores operaciones de almacenamiento en el packing, a la vez que se busca maximizar el margen reportado para el productor y el packing.

5.1.1. Hipótesis

El modelo se elaboró partiendo de ciertas hipótesis, con el objetivo de simplificar su abordaje. Todas las hipótesis realizadas representan circunstancias que escapan del alcance definido, las cuales resultan ser puntos de análisis interesantes a abordar en futuras investigaciones. A continuación, se describen las hipótesis realizadas:

- Las pérdidas de manzanas asociadas a factores climáticos son fijas, por lo tanto no se tendrán en cuenta en la función objetivo.
- La cantidad de mano de obra es fija dependiendo del tamaño del problema, y todos los miembros de la cuadrilla tienen el mismo nivel de capacitación.
- Los costos de plantación y cultivo son fijos dado que no son afectados por las variables en estudio. Por ello, no son incluidos dentro de la función a optimizar.
- La cantidad de manzanos de cada variedad es un parámetro. El modelo no decide sobre la cantidad de árboles a plantar, ni la distribución de esta cantidad entre las diferentes variedades.
- La cantidad de masa en kilogramos por bin es independiente de la variedad y del calibre de la manzana.
- Los lotes son homogéneos en términos de calidad. Para todas las manzanas dentro del bin se comparten las mismas características en tanto a defectos fisiológicos, hongos, coloración y otros atributos inherentes a la calidad del fruto. Sin embargo, sí se distingue entre calibres diferentes dentro de un mismo bin cuando este llega a la etapa de clasificación, previo a la venta.
- Todos los bins almacenados en la cámara de atmósfera controlada presentan una distribución uniforme de calibres. Esta distribución se asume como resultado de un proceso de raleo realizado de manera óptima, con el objetivo de maximizar la proporción de frutos de calibre medio. En consecuencia, el modelo no contempla explícitamente la actividad de raleo de los manzanos, dado que se considera un proceso previamente optimizado.

- Considera una única cámara de almacenamiento. Sin embargo, para lograr una mejor representación de la realidad, en la que generalmente existen múltiples cámaras en el packing, se estableció una cantidad mínima de bins que pueden retirarse de la cámara. Esto se debe a que, una vez abierta, se pierde la conservación de la atmósfera controlada y la cámara pasa a ser únicamente de refrigeración, es decir, una cámara convencional.
- No hay devoluciones del cliente al proveedor.
- El momento inicial del modelo corresponde al momento de cosecha de cada variedad. Dado que en la realidad las fechas de cosecha varían según la variedad, se ajustaron los datos de precios y demanda para reflejar las tendencias temporales propias de cada variedad. En este sentido, el mes de cosecha de cada variedad se considera como el punto de inicio, y el índice temporal se utiliza para representar la cantidad de períodos transcurridos desde dicho momento de cosecha.

5.1.2. Conjuntos

- $T = \{1, \dots, t\}$ conjunto de períodos en que se efectúan las ventas.
- $J = \{1, \dots, j\}$ conjunto de períodos en que se extraen manzanas de la cámara de atmósfera controlada para ingresar en la cámara de almacenamiento convencional.
- $I = \{1, \dots, i\}$ conjunto de las variedades de manzana.
- $K = \{1, \dots, k\}$ conjunto de los calibres de las manzanas.
- $H = \{1, \dots, h\}$ conjunto de los clientes.
- $G = \{1, \dots, g\}$ conjunto de los grados de capacitación de la mano de obra.

5.1.3. Parámetros

- Kbm : masa de manzanas por bin (kg/bin).
- D_{ith} : demanda de la variedad i en el período t del cliente h (kg).
- pv_{ikth} : precio de venta de la variedad i y calibre k en el período t para el cliente h (\$/kg).
- b_i : cantidad de árboles de la variedad i al momento de la cosecha (árboles).
- Pr_i : cantidad producida por árbol de la variedad i (ton/árbol).
- cc : costo de almacenar un bin en cámara de almacenamiento convencional por un período (\$/período t).
- cac : costo de almacenar un bin en cámara de atmósfera controlada por un período (\$/período j).
- cmo_g : costo de contratación de mano de obra para cada grado de capacitación g (\$/año).
- pmo_g : porcentaje de pérdidas en cosecha para el grado de capacitación de mano de obra g (%).
- α_i : tasa de deterioro de calidad por almacenamiento en cámara de atmósfera controlada para la variedad i (%).
- β_i : tasa de deterioro de calidad por almacenamiento en cámara de almacenamiento convencional para la variedad i (%).

- γ_{ik} : porcentaje de manzanas de la variedad i con calibre k (%).
- δ_h : tasa de afectación del precio de venta debido a la calidad para el cliente h (%).
- ϵ_{jt} : parámetro binario que vale 1 si $t \geq j$ y 0 si $t < j$.
- λ_{jt} : parámetro binario que vale 1 si $t = j$ y 0 si $t \neq j$.
- Q_{min} : mínimo nivel de calidad aceptable para consumición (%).
- Q_{max_g} : máximo nivel de calidad inicial que tiene la fruta dado el grado de capacitación de la mano de obra g (%).
- $Q_{tol_{ikjth}}$: mínimo nivel de calidad aceptable de la variedad i y calibre k para fruta almacenada en atmósfera controlada j períodos, a ser vendida en t al cliente h (%).
- M : capacidad máxima de la cámara de atmósfera controlada (bins).
- N : capacidad máxima de la cámara de almacenamiento convencional (bins).
- L : número mínimo de bins que se pueden extraer de la cámara de atmósfera controlada (bins).
- B : número suficientemente grande.

5.1.4. Variables de decisión

Variables independientes

Las siguientes variables de decisión del modelo son consideradas variables independientes. Esto significa que representan una decisión que debe ser tomada por el productor o el packing, y no quedan determinadas a partir de las condiciones del modelo.

- C_{ikjt} : cantidad de bins de la variedad i y calibre k , sacados de cámara de atmósfera controlada en el período j , almacenados en cámara convencional en el período t .
- A_{ij} : cantidad de bins de la variedad i en cámara de atmósfera controlada en el período j .
- V_{ikjth} : masa en kilogramos de la variedad i y calibre k , sacada de cámara de atmósfera controlada en el período j , vendida en el período t al cliente h .
- Y_{ij} : variable binaria que vale 1 si la cámara de atmósfera controlada se abre para extraer manzanas de la variedad i en el período j y 0 si no.
- W_{ij} : cantidad de bins de la variedad i que se extraen de la cámara de atmósfera controlada en el período j .
- MO_g : variable binaria que vale 1 si se elige el nivel de capacitación g y 0 si no.

Variables dependientes

Las variables dependientes son variables que se definen a partir de condiciones del modelo, y no representan decisiones reales por parte del productor ni del packing. Se definen a partir de las variables de decisión independientes.

- P_{ikjt} : masa en kilogramos de manzanas de la variedad i y calibre k , extraídas de cámara de atmósfera controlada en el período j , que se pierden en el período t en cámara convencional.
- R_{ij} : cantidad de bins de la variedad i que se deterioran en el período j en cámara de atmósfera controlada.

- X_{ijt} : variable binaria que vale 1 si hay pérdidas de la variedad i , extraída de cámara de atmósfera controlada en el período j , almacenada en cámara convencional en el período t y 0 si no.
- S_{ij} : variable binaria que vale 1 si hay pérdidas de la variedad i en el período j en cámara de atmósfera controlada y 0 si no.
- Z_{ikjth} : variable binaria que vale 1 si la manzana de la variedad i y calibre k , extraída de cámara de atmósfera controlada en el período j , puede ser vendida en el período t al cliente h y 0 si no.
- Q_{ijt} : variable que indica la calidad de la variedad i , extraída de cámara de atmósfera controlada en el período j , almacenada en cámara convencional en el período t .
- Qac_{ij} : variable que indica la calidad de la variedad i en el período j en cámara de atmósfera controlada.

5.1.5. Restricciones

Restricción de capacidad de venta: En cada período de venta $t \in T$, la cantidad total de manzanas vendidas no puede superar la cantidad almacenada en cámara convencional. Se debe cumplir para las diferentes variedades y calibres.

$$\sum_h V_{ikjth} \leq C_{ikjt} \cdot Kbm, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (4)$$

Restricción de capacidad máxima de almacenamiento: Tanto para la cámara de atmósfera controlada, como para la cámara convencional, la cantidad de manzanas que se almacenan no puede superar la capacidad máxima de las cámaras en ningún período. En el caso de la cámara de atmósfera controlada, solo se considera la cantidad inicial, ya que su contenido únicamente disminuye.

$$\sum_i A_{i1} \leq M \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_k \sum_j C_{ikjt} \leq N, \quad \forall t \quad (6)$$

Restricción de lote mínimo a sacar de cámara de atmósfera controlada: Las cámaras de atmósfera controlada presentan la limitación de que, al abrirse para retirar lotes, se pierde la atmósfera creada en su interior. Para modelar esta condición, se define el siguiente conjunto de restricciones, que establece que, si en un período se abre la cámara, debe transferirse un lote mínimo a la cámara convencional. Este lote mínimo corresponde, en la práctica, a la cantidad mínima de bins almacenados en este tipo de cámaras. La restricción se aplica a todas las variedades y períodos de almacenamiento.

$$A_{i(j-4)} - A_{ij} \geq L \cdot Y_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (7)$$

$$Y_{ij} \cdot B \geq A_{i(j-4)} - A_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (8)$$

Balance de inventario en cámara de atmósfera controlada: Es el balance de inventario de la cámara de atmósfera controlada. La cantidad a almacenar en un período $j + 4 \in J$ está dada por la diferencia entre la cantidad de manzanas que había almacenadas en el período anterior y el flujo de manzanas que salió de la cámara, tanto por pérdidas como por transferencia a cámara convencional. Esto se debe cumplir para todas las variedades y períodos en los que se almacena.

$$W_{ij} + R_{ij} = A_{i(j-4)} - A_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (9)$$

Balance de inventario en cámara convencional: Se establece que la cantidad de manzanas a almacenar en la cámara convencional en el período $t+1 \in T$ queda determinada por la diferencia entre los ingresos de manzanas y lo almacenado en el período anterior, y los egresos del período, ya sea por venta o pérdida. Este balance debe verificarse para todas las variedades, calibres y períodos.

$$C_{ikjt} \cdot Kbm = C_{ikj(t-1)} \cdot Kbm + \gamma_{ik} \cdot \lambda_{jt} \cdot W_{ij} \cdot Kbm - \sum_h V_{ikj(t-1)h} - P_{ikj(t-1)}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (10)$$

Restricción de demanda: La cantidad de manzanas vendida nunca puede superar la demanda percibida. Esto debe cumplirse para todos los períodos, variedades y clientes.

$$\sum_k \sum_j V_{ikjth} \leq D_{ith}, \quad \forall i, \forall t, \forall h \quad (11)$$

Restricción de almacenamiento inicial: La cantidad inicial de manzanas a almacenar, considerando ambos tipos de cámaras, debe ser igual a la cantidad de manzanas con las que se cuenta inmediatamente luego de la cosecha. Esta restricción se debe cumplir para todas las variedades de manzanas.

$$C_{ik11} = \gamma_{ik} \cdot (b_i \cdot \frac{1000 \cdot Pr_i}{Kbm} \cdot \sum_g (MO_g \cdot (1 - pmog)) - A_{i1}), \quad \forall i, \forall k \quad (12)$$

Restricción de elección de mano de obra: Se debe elegir a un único tipo de mano de obra.

$$\sum_g MO_g = 1 \quad (13)$$

Restricción de evolución de calidad por almacenamiento: La calidad de las manzanas en cada momento está dada por la diferencia entre su calidad inicial y el deterioro sufrido por el tiempo en almacenamiento. Esto debe cumplirse para todas las variedades y en todos los momentos.

$$Qac_{ij} = \sum_g MO_g \cdot Qmax_g - \alpha_i \cdot (j - 1), \quad \forall i, \forall j \quad (14)$$

$$Q_{ijt} = \sum_g MO_g \cdot Qmax_g - [\alpha_i \cdot (j - 1) + \epsilon_{jt} \cdot \beta_i \cdot (t - j)], \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (15)$$

Restricción de activación de pérdidas por calidad: Las variables binarias S_{ij} y X_{ijt} se activan cuando la calidad de la fruta es menor que la calidad sanitaria mínima aceptable para consumición. El siguiente conjunto de restricciones modela este efecto.

$$Qac_{ij} - Qmin \leq B(1 - S_{ij}), \quad \forall i, \forall j \quad (16)$$

$$Qac_{ij} - Qmin \geq -B \cdot S_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (17)$$

$$Q_{ijt} - Qmin \leq B(1 - X_{ijt}), \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (18)$$

$$Q_{ijt} - Qmin \geq -B \cdot X_{ijt}, \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (19)$$

Restricciones de definición de pérdidas por calidad: Las pérdidas generadas en cada período se determinan según el nivel de calidad de la fruta. Si la variable binaria que indica pérdidas está activa, el lote de esa variedad se considera perdido. Esta relación se establece mediante las

siguientes restricciones, para ambos tipos de cámaras.

$$R_{ij} \leq B \cdot S_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (20)$$

$$R_{ij} \leq A_{i(j-4)}, \quad \forall i, \forall j \quad (21)$$

$$R_{ij} \geq A_{i(j-4)} - B \cdot (1 - S_{ij}), \quad \forall i, \forall j \quad (22)$$

$$\sum_k P_{ikjt} \leq B \cdot X_{ijt}, \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (23)$$

$$P_{ikjt} \leq C_{ikjt} \cdot Kbm, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (24)$$

$$P_{ikjt} \geq C_{ikjt} \cdot Kbm - B \cdot (1 - X_{ijt}), \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (25)$$

Restricción de activación de venta a clientes según calidad: Si la calidad de la fruta es aceptada por el cliente, la variable binaria Z_{ikjtc} se activará. Este mecanismo se define a partir del siguiente par de restricciones.

$$Q_{ijt} - Qtol_{ikjth} \leq B \cdot Z_{ikjth}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (26)$$

$$Q_{ijt} - Qtol_{ikjth} \geq B \cdot (Z_{ikjth} - 1), \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (27)$$

Restricción de posibilidad de venta según la calidad del cliente: Si la calidad de las manzanas es insuficiente para cumplir con los requerimientos de un cliente, entonces no es posible vender dicho lote. Además, la variable de ventas solamente tiene sentido para períodos t posteriores a j .

$$V_{ikjth} \leq B \cdot Z_{ikjth} \cdot \epsilon_{jt}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (28)$$

Restricción de posibilidad de almacenamiento en cámara convencional: El almacenamiento en cámaras convencionales solo tiene sentido para períodos t posteriores a j .

$$C_{ikjt} \leq B \cdot \epsilon_{jt}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (29)$$

Restricciones de dominio de variables: Los lotes almacenados en cámara de atmósfera controlada A_{ij} son bins enteros y no se subdividen. Como consecuencia, W_{ij} también es entero. El dominio de definición de estas dos variables son los enteros positivos. R_{ij} se puede considerar un real, dado que va a tomar valores enteros dada su relación con A_{ij} y W_{ij} .

Las manzanas en cámara convencional C_{ikjt} están almacenadas en bins, pero se pueden subdividir para su venta en kilogramos. El dominio de definición de esta variable son los reales positivos. Las manzanas vendidas V_{ikjth} , y las pérdidas generadas P_{ikjt} están definidas en masa en kilogramos, por lo que van a ser números reales positivos. La calidad de la fruta Q_{acij} y Q_{ijt} son números reales, dada por su definición.

Finalmente, las variables X_{ijt} , S_{ij} , Z_{ikjth} , Y_{ij} y MO_g son variables binarias que indican decisiones.

$$A_{ij} \geq 0, A_{ij} \in \mathbb{Z}, \quad \forall i, \forall j \quad (30)$$

$$W_{ij} \geq 0, W_{ij} \in \mathbb{Z}, \quad \forall i, \forall j \quad (31)$$

$$C_{ikjt} \geq 0, C_{ikjt} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (32)$$

$$V_{ikjth} \geq 0, V_{ikjth} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (33)$$

$$P_{ikjt} \geq 0, P_{ikjt} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (34)$$

$$R_{ij} \geq 0, R_{ij} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall j \quad (35)$$

$$Q_{acij} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall j \quad (36)$$

$$Q_{ijt} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall j, \forall t, \quad (37)$$

$$X_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (38)$$

$$S_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (39)$$

$$Z_{ikjth} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (40)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (41)$$

$$MO_g \in \{0, 1\}, \quad \forall g \quad (42)$$

5.1.6. Función objetivo

El problema en estudio se trata de un escenario multiobjetivo, por lo que el modelo presentado cuenta con dos funciones objetivo.

La primera función objetivo busca maximizar el margen de ganancia percibido por el productor y packing. Este está dado por la diferencia entre los ingresos por ventas y los costos contemplados por el modelo, los cuales incluyen los costos de almacenamiento de ambas cámaras y el costo de la mano de obra.

$$\begin{aligned} \max \sum_i \sum_k \sum_j \sum_t \sum_h V_{ikjth} \cdot pv_{ikth} [1 - \delta_h(\alpha_i \cdot (j - 1) + \epsilon_{jt} \cdot \beta_i \cdot (t - j))] - \\ \sum_i \sum_j A_{ij} \cdot cac - \sum_i \sum_k \sum_j \sum_t C_{ikjt} \cdot cc - \sum_g MO_g \cdot cmog \end{aligned} \quad (43)$$

La segunda función objetivo busca minimizar las pérdidas de manzanas generadas en las etapas de cosecha y almacenamiento, tanto en cámara de atmósfera controlada como convencional.

$$\begin{aligned} \min \sum_i b_i \cdot (1000 \cdot Pr_i) \cdot \sum_g MO_g \cdot pmog + \\ \sum_i \sum_k \sum_j \sum_t P_{ikjt} + \sum_i \sum_j R_{ij} \cdot Kbm \end{aligned} \quad (44)$$

5.2. Formulación del modelo matemático

$$\begin{aligned} \max \sum_i \sum_k \sum_j \sum_t \sum_h V_{ikjth} \cdot pv_{ikth} [1 - \delta_h(\alpha_i \cdot (j - 1) + \epsilon_{jt} \cdot \beta_i \cdot (t - j))] - \\ \sum_i \sum_j A_{ij} \cdot cac - \sum_i \sum_k \sum_j \sum_t C_{ikjt} \cdot cc - \sum_g MO_g \cdot cmog \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \min \sum_i b_i \cdot (1000 \cdot Pr_i) \cdot \sum_g MO_g \cdot pmog + \\ \sum_i \sum_k \sum_j \sum_t P_{ikjt} + \sum_i \sum_j R_{ij} \cdot Kbm \end{aligned} \quad (46)$$

Sujeto a:

$$C_{ik11} = \gamma_{ik} \cdot (b_i \cdot \frac{1000 \cdot Pr_i}{Kbm} \cdot \sum_g (MO_g \cdot (1 - pmog)) - A_{i1}), \quad \forall i, \forall k \quad (47)$$

$$\sum_h V_{ikjth} \leq C_{ikjt} \cdot Kbm, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (48)$$

$$\sum_i A_{i1} \leq M \quad (49)$$

$$\sum_i \sum_k \sum_j C_{ikjt} \leq N, \quad \forall t \quad (50)$$

$$A_{i(j-4)} - A_{ij} \geq L \cdot Y_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (51)$$

$$Y_{ij} \cdot B \geq A_{i(j-4)} - A_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (52)$$

$$W_{ij} + R_{ij} = A_{i(j-4)} - A_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (53)$$

$$C_{ikjt} \cdot Kbm =$$

$$C_{ikj(t-1)} \cdot Kbm + \gamma_{ik} \cdot \lambda_{jt} \cdot W_{ij} \cdot Kbm - \sum_h V_{ikj(t-1)h} - P_{ikj(t-1)}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (54)$$

$$\sum_k \sum_j V_{ikjth} \leq D_{ith}, \quad \forall i, \forall t, \forall h \quad (55)$$

$$\sum_g MO_g = 1 \quad (56)$$

$$Qac_{ij} = \sum_g MO_g \cdot Qmax_g - \alpha_i \cdot (j-1), \quad \forall i, \forall j \quad (57)$$

$$Q_{ijt} = \sum_g MO_g \cdot Qmax_g - [\alpha_i \cdot (j-1) + \epsilon_{jt} \cdot \beta_i \cdot (t-j)], \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (58)$$

$$Qac_{ij} - Qmin \leq B(1 - S_{ij}), \quad \forall i, \forall j \quad (59)$$

$$Qac_{ij} - Qmin \geq -B \cdot S_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (60)$$

$$Q_{ijt} - Qmin \leq B(1 - X_{ijt}), \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (61)$$

$$Q_{ijt} - Qmin \geq -B \cdot X_{ijt}, \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (62)$$

$$R_{ij} \leq B \cdot S_{ij}, \quad \forall i, \forall j \quad (63)$$

$$R_{ij} \leq A_{i(j-4)}, \quad \forall i, \forall j \quad (64)$$

$$R_{ij} \geq A_{i(j-4)} - B \cdot (1 - S_{ij}), \quad \forall i, \forall j \quad (65)$$

$$\sum_k P_{ikjt} \leq B \cdot X_{ijt}, \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (66)$$

$$P_{ikjt} \leq C_{ikjt} \cdot Kbm, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (67)$$

$$P_{ikjt} \geq C_{ikjt} \cdot Kbm - B \cdot (1 - X_{ijt}), \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (68)$$

$$Q_{ijt} - Qtol_{ikjth} \leq B \cdot Z_{ikjth}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (69)$$

$$Q_{ijt} - Qtol_{ikjth} \geq B \cdot (Z_{ikjth} - 1), \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (70)$$

$$V_{ikjth} \leq B \cdot Z_{ikjth} \cdot \epsilon_{jt}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (71)$$

$$C_{ikjt} \leq B \cdot \epsilon_{jt}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (72)$$

$$A_{ij} \geq 0, A_{ij} \in \mathbb{Z}, \quad \forall i, \forall j \quad (73)$$

$$W_{ij} \geq 0, W_{ij} \in \mathbb{Z}, \quad \forall i, \forall j \quad (74)$$

$$C_{ikjt} \geq 0, C_{ikjt} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (75)$$

$$V_{ikjth} \geq 0, V_{ikjth} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (76)$$

$$P_{ikjt} \geq 0, P_{ikjt} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t \quad (77)$$

$$R_{ij} \geq 0, R_{ij} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall j \quad (78)$$

$$Q_{ac_{ij}} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall j \quad (79)$$

$$Q_{ijt} \in \mathbb{R}, \quad \forall i, \forall j, \forall t, \quad (80)$$

$$X_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (81)$$

$$S_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (82)$$

$$Z_{ikjth} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall k, \forall j, \forall t, \forall h \quad (83)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (84)$$

$$MO_g \in \{0, 1\}, \quad \forall g \quad (85)$$

6. Implementación del modelo matemático

En este capítulo se detalla la implementación del modelo matemático, un paso fundamental para la obtención de resultados y su aplicación práctica. En la sección 6.1, se presentan los datos utilizados para la implementación del modelo. En la sección 6.2 se presenta la estrategia utilizada para la validación, implementación y análisis de sensibilidad.

6.1. Datos

Como consideración general, dado que el presente estudio se llevó a cabo en Uruguay, todos los valores monetarios expuestos en el informe están expresados en pesos uruguayos (UYU).

Los datos utilizados para la implementación del modelo provienen de diversas fuentes. Los parámetros de distribución de calibres por variedad, los costos de almacenamiento en las cámaras, la capacidad máxima de las mismas, la cantidad mínima de lotes a extraer de la cámara de atmósfera controlada, los kilogramos por bin y la calidad mínima tolerable por los clientes fueron obtenidos a través de consultas con un productor y packing de referencia para este trabajo. En cuanto a la calidad mínima exigida por los supermercados, es importante señalar que, debido a sus estrictos estándares de calidad, su demanda se limita exclusivamente al calibre intermedio.

Las dimensiones del problema se definieron con el propósito de replicar las condiciones de uno de los contactos, tomando su caso de estudio como referencia para la implementación del modelo. Esto influye en la escala utilizada, considerando la cuota de mercado de este productor (3%), así como la proporción de ventas a los dos principales clientes: el mercado mayorista, que recibe el 60 % de la oferta, y las grandes superficies, que adquieren el 40 % restante. Este modelo de negocio se replica en otros productores, de forma que representa un caso significativo que permite extraer conclusiones de carácter general.

La demanda, así como los precios de venta, se estimaron a partir de los valores publicados por la UAM entre 01/2022-09/2024 [38], escalándolos a las dimensiones del problema en cuestión y realizando los correspondientes ajustes. El porcentaje de afectación del precio según la calidad se estimó como el promedio de la diferencia de precios sobre el precio máximo.

Otros parámetros fueron obtenidos a partir de referencias del sector. De la fuente [27] se extrajeron la cantidad de árboles por variedad y la productividad de los bosques.

Los datos de pérdidas estimadas para diferentes niveles de mano de obra, así como sus respectivos costos, fueron obtenidos a través del contacto con una ingeniera agrónoma especializada en manzanas. Distinguió tres tipos de mano de obra: personal fijo, cuadrillas estables y cuadrillas inestables, para las cuales definió pérdidas materiales en cosecha de 5 %, 10 % y 30 % respectivamente [36]. No obstante, no fue posible determinar el dato de la calidad máxima inicial de las manzanas según el grado de capacitación de mano de obra, ya que no es un tema ampliamente estudiado, ni existen valores de referencia establecidos. Por lo tanto, se utilizaron valores aproximados de referencia y, posteriormente, se evaluará la sensibilidad del modelo con respecto a estos valores en el correspondiente análisis.

Con base en las fuentes [21] y [10] se llevó a cabo la estimación de los parámetros α y β , que representan las tasas de deterioro en cámaras de almacenamiento de atmósfera controlada (AC) y cámara convencional (CC), respectivamente. Ambas fuentes proveen referencias para el tiempo de almacenamiento de diversas variedades de manzana, tanto en cámaras de refrigeración convencional como en cámaras de atmósfera controlada. Utilizando esta información, y teniendo en cuenta que se considera que un mes tiene 4 semanas, se estimaron los parámetros α y β para las diferentes variedades analizadas (ver Tabla 1). Por cómo se definieron estos parámetros, la calidad mínima para consumición queda definida como 0 para todos los casos. Esto se debe a que las tasas de deterioro de calidad se calcularon considerando que el 100 % de la calidad se pierde paulatinamente durante el almacenamiento. Por lo tanto, cuando este valor llega a 0, es

que se alcanzó el tiempo de almacenamiento máximo que la fruta puede soportar en condiciones sanitarias para su consumo.

Tabla 1: Estimación de parámetros α y β . Fuente: elaboración propia basada en [21] y [10].

Variedad	Cámara AC		Cámara CC	
	Máx. almacenamiento	α (%)	Máx. almacenamiento	β (%)
Cripps Pink	9 meses	2,78	6 meses	4,17
Red	10,5 meses	2,38	7 meses	3,57
Gala	6 meses	4,17	4 meses	6,25

Las diferentes variedades de manzanas se cosechan en momentos distintos del año, sin embargo, a efectos del modelo matemático se llevan todos los momentos de cosecha a un mismo tiempo inicial. De esta forma, los índices de tiempo para las distintas variedades de manzanas representan momentos del año distintos, pese a que tengan el mismo valor numérico. Por lo cual, estos representan la cantidad de períodos que pasaron desde su momento de cosecha.

El modelo considera dos conjuntos de tiempo. El conjunto T representa los períodos en que se efectúan las ventas, corresponden a una semana. Por otro lado, el conjunto J es el de los períodos en que se extraen manzanas de la cámara de atmósfera controlada para ingresar en la cámara de almacenamiento convencional, corresponden a un mes. Ambos conjuntos abarcan el mismo horizonte temporal, pero con diferente granularidad. La utilización de ambos conjuntos otorga trazabilidad a los diferentes bins, los cuales quedan determinados por el momento en que pasaron de un tipo de almacenamiento (atmósfera controlada) al otro (almacenamiento convencional) y por el momento en el que fueron extraídos del almacenamiento convencional para ser vendidos. La intención del uso de múltiples conjuntos de tiempo es para reflejar adecuadamente el deterioro de la fruta a través de su pasaje por las diferentes cámaras de almacenamiento. Este enfoque de considerar diferentes conjuntos de tiempo fue parte de la estrategia adoptada en otros modelos matemáticos tomados como referencia para este trabajo, [4] y [11].

Todos los datos necesarios para la implementación se encuentran en el anexo virtual.

6.2. Estrategia de implementación

La implementación del modelo matemático se realizó a través del método descrito en 3.4.2. Sin embargo, debido a que esta metodología puede implicar largos tiempos de ejecución, se hizo uso de otras técnicas de resolución para la ejecución de los casos de validación y los análisis de sensibilidad, que permitieron obtener conclusiones en tiempos razonables sin comprometer los objetivos del estudio.

Para los casos de validación, cada caso límite y el “piloto” se implementaron de manera independiente para cada una de las funciones objetivo. La función objetivo no optimizada se incluyó como una restricción de asignación para determinar su valor. Esto se realiza con el propósito de verificar la coherencia del modelo en ambas funciones objetivo. En este caso, no es de interés construir la frontera de Pareto.

Los análisis de sensibilidad tienen como objetivo evaluar cómo la variación de ciertos parámetros afecta los resultados del modelo. Debido al comportamiento del modelo durante la construcción de la frontera de Pareto, se observó que es más sensible a la función de margen que a la de pérdidas. La variación que se produce sobre esta dimensión es mayor que la diferencia entre las pérdidas generadas. Por esta razón, los análisis de sensibilidad tienen como objetivo estudiar los efectos de los parámetros sobre la función objetivo del margen, priorizando su impacto sobre la función de pérdidas.

Por lo tanto, para realizar los análisis de sensibilidad se optimizó únicamente la función objetivo de margen. El valor de la función objetivo de pérdidas se registró en una variable para analizar su comportamiento respecto al valor original, pero no se optimizó.

7. Validación del modelo matemático

En este capítulo se detallan los procedimientos empleados para validar el modelo matemático, evaluando si el comportamiento observado en la implementación del modelo concuerda con las expectativas frente a situaciones específicas.

El objetivo de la validación es confirmar que el modelo se comporta de la manera esperada y que las distintas restricciones operan correctamente. En caso de que el modelo no se ajuste a las expectativas, se analiza la situación y se realizan las correcciones pertinentes. En tales casos, la validación se considera exitosa, dado que el objetivo principal de esta fase es identificar posibles debilidades y defectos en el modelo.

Para la validación del modelo, se estableció un caso base sobre el cual se llevaron a cabo diversas pruebas con el objetivo de evaluar la robustez y consistencia del modelo desarrollado. Para ello, se ejecutó el modelo en cada función objetivo de manera independiente, utilizando los mismos casos de estudio en las dos. Estas pruebas buscan analizar el comportamiento del modelo ante casos límite y situaciones particulares en las cuales, dadas las condiciones de entrada, se anticipa un comportamiento específico.

7.1. Caso base

En una primera instancia, se utilizó un conjunto de datos acotado, reduciendo la cantidad de elementos de los conjuntos considerados para lograr una interpretación más sencilla y rápida, pero procurando obtener un caso representativo. Este caso base fue denominado modelo “piloto”, sobre el cual se llevaron a cabo las pruebas de validación. Con el piloto, se validó la funcionalidad global del modelo, logrando una solución fácilmente interpretable. Asimismo, se verificó el comportamiento de las diferentes restricciones.

El caso base elegido considera:

- 10 semanas (períodos t)
- 3 meses (períodos j)
- 1 variedad de manzanas (elementos i)
- 2 calibres (elementos k)
- 2 clientes (elementos h)
- 3 tipos de mano de obra (elementos g)

Al hacer la implementación, se optimizó cada función objetivo por separado, registrando el valor de la función no optimizada en una variable. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados para el caso base.

	Caso base	
	Margen (\$, miles)	Pérdidas (toneladas)
Máx. Margen (\$)	659,6	3,3
Min. Pérdidas (kg)	-218,3	0,9

Como era de esperar, los objetivos son contrapuestos: al mejorar uno, el otro empeora, reafirmando la elección de un enfoque multiobjetivo.

En la Figura 15 se muestran los valores de las diferentes variables, agrupados en función del tiempo, para los casos óptimos de maximización del margen y minimización de pérdidas. Esto permite visualizar que los únicos ingresos a la cámara convencional se dan en momentos de egresos de cámara de atmósfera controlada. De la misma forma, en los momentos donde se

producen ventas y se generan pérdidas, disminuye la cantidad almacenada en cámara convencional. De este modo, se valida que el flujo modelado funciona correctamente a través de las diferentes etapas.

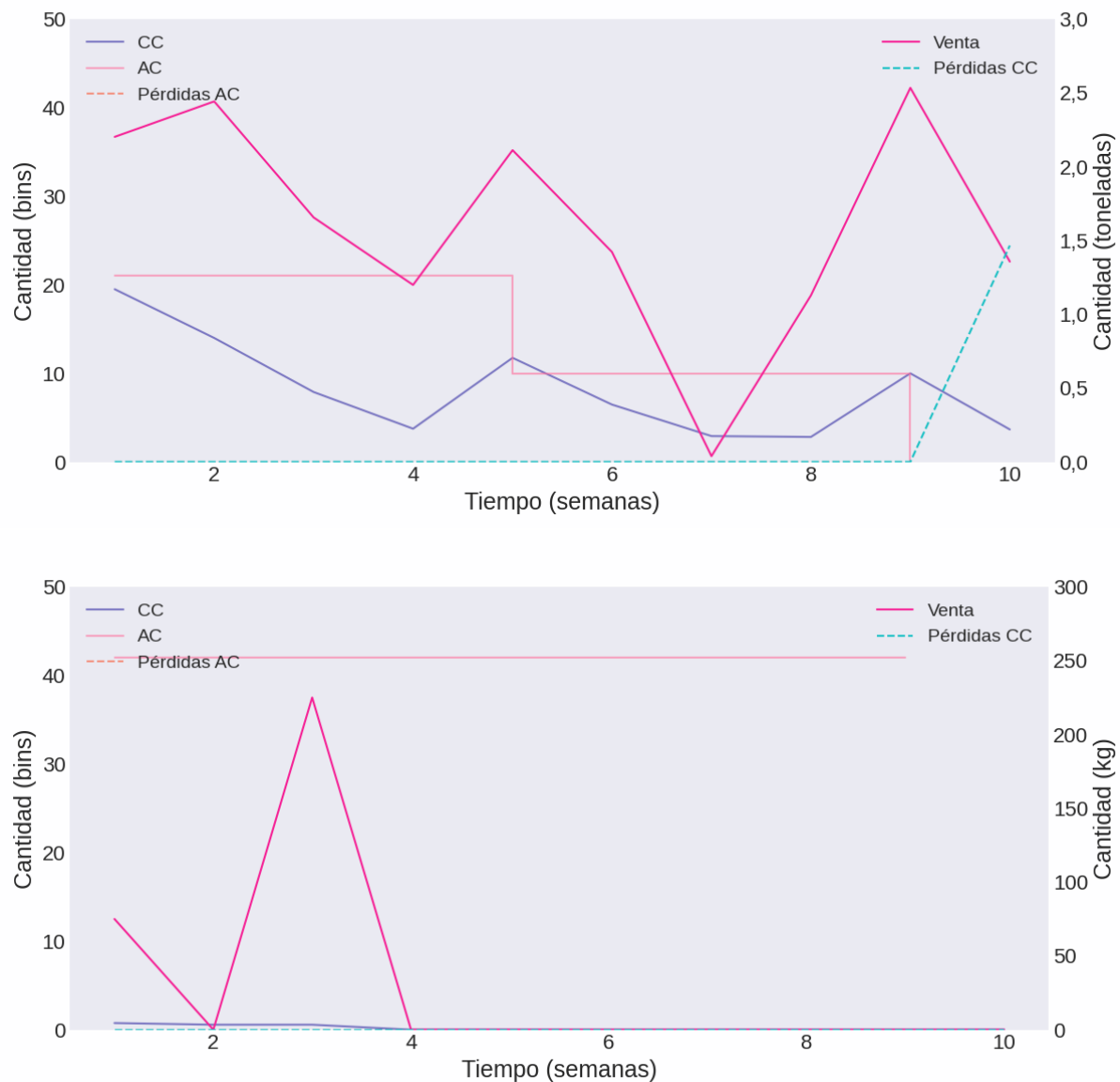


Figura 15: Resultados de la validación para las funciones de maximizar margen y minimizar pérdidas, respectivamente.

7.2. Escenarios de Validación del Modelo

Una vez implementado el caso base (modelo piloto), con el objetivo de evaluar el correcto funcionamiento del modelo se implementaron diversos casos borde y de validación, diseñados para representar situaciones límite o condiciones específicas. Como pruebas de validación se implementaron escenarios sin pérdidas, con iguales costos de mano de obra para los grados de capacitación, de demanda nula y tasas de deterioro extremadamente altas. Los casos de validación se describen a continuación, con los parámetros establecidos y los resultados esperados.

7.2.1. Capacidades de almacenamiento insuficientes

Se analizan dos casos. Primero, si la cantidad de manzanas excede la capacidad de almacenamiento en atmósfera controlada. En este caso, se espera que el modelo active la restricción correspondiente y almacene parte de las manzanas en cámaras convencionales desde el primer período. En segundo lugar, si la cantidad supera la capacidad total de ambas cámaras. El modelo debería optar por estrategias como seleccionar mano de obra con menor nivel de capacitación, que aumente las pérdidas generadas inicialmente para compensar el excedente que no puede almacenarse. La solución debería ser declarada no factible en casos extremos, donde ni eligiendo la peor mano de obra se puedan generar suficientes pérdidas en cosecha como para compensar todo el excedente.

7.2.2. Restricciones de lote mínimo

Se evalúan dos escenarios. En el primero, el lote mínimo es muy grande. El modelo debería concentrar el almacenamiento en cámaras convencionales desde el inicio, ya que abrir una cámara de atmósfera controlada implicaría acumular ventas durante varios períodos, dificultando satisfacer la demanda. En el segundo caso, si el lote mínimo es muy bajo y las tasas de deterioro en cámaras convencionales son elevadas, el modelo debería preferir el almacenamiento en cámara controlada y recurrir a cámaras convencionales solo al momento de realizar la venta.

7.2.3. Variaciones en los parámetros α y β

Se probaron diferentes combinaciones de los parámetros α (tasas de deterioro de calidad por almacenamiento en cámara de atmósfera controlada) y β (tasas de deterioro de calidad por almacenamiento en cámara convencional):

- Caso 1: α muy alto y β muy bajo.
- Caso 2: α muy bajo y β muy alto.
- Caso 3: Valores muy altos para α y β .
- Caso 4: Valores muy bajos para ambos parámetros.

En cada caso, se espera que el modelo ajuste la estrategia de almacenamiento y venta en función de los parámetros, maximizando el margen y minimizando las pérdidas según la calidad y el tiempo de almacenamiento. Esto implicaría un gran volumen de conservación en cámara convencional para el caso 1, en el caso 2 gran volumen de conservación en cámara de atmósfera controlada, altas pérdidas y bajo margen en el caso 3, y para el último caso se espera que haya pocas pérdidas y un margen elevado.

7.2.4. Costos de almacenamiento superiores a los precios de venta

En este caso, se establecen costos de almacenamiento significativamente mayores que los precios de venta de las manzanas. Se espera que el modelo venda la mayor cantidad posible de manzanas en los primeros períodos para evitar costos de almacenamiento elevados; además, se espera que el resultado general para el margen sea peor en comparación con el margen obtenido para el caso de validación base.

7.3. Modificaciones introducidas a raíz del resultado de validaciones

En la primera implementación del piloto, se notó que los balances de inventario en las cámaras de almacenamiento no estaban funcionando de la manera intencionada. Para solucionar esto, se introdujo una variable de decisión que representa el flujo entre cámaras (W_{ij}). Esta

variable refleja lo que sale de una cámara en un período e ingresa a la otra cámara en el período siguiente.

La introducción de esta nueva variable también provocó alteraciones en la lógica de los balances de inventario. Incorporando estos cambios, se logró obtener soluciones acordes a lo esperado, mostrando movimientos entre períodos que respetan los órdenes de precedencia, ventas coherentes con el inventario almacenado en las cámaras de refrigeración convencional, y salidas de bins “escalonadas”, (es decir, cantidades enteras de bins) desde la cámara de atmósfera controlada hacia el almacenamiento convencional.

Más adelante, durante la ejecución del caso de validación donde se impusieron tasas de deterioro nulas para cada una de las cámaras, se identificó que no existía una lógica bien definida para considerar las pérdidas que ocurrían en cámaras de atmósfera controlada. Como consecuencia, el modelo de minimización de pérdidas adoptaba una estrategia en la que conservaba la fruta en cámaras de atmósfera controlada durante todos los períodos, ya que en estas no se registraban pérdidas de forma explícita. En cambio, las pérdidas solo se materializaban al transferir la fruta a cámaras de atmósfera convencional. Esto generaba una situación en la que el modelo permitía el almacenamiento prolongado de fruta en descomposición dentro de las cámaras de atmósfera controlada, sin reflejar adecuadamente el impacto del deterioro en la calidad del producto.

Para solucionar este problema, se replicó la lógica de activación de pérdidas ya definida para cámaras de refrigeración convencional en las cámaras de atmósfera controlada. Este problema surgió debido a que inicialmente se consideró la hipótesis de que las tasas de descomposición en el almacenamiento en cámaras de atmósfera controladas no eran suficientemente altas como para producir pérdidas dentro de ellas. Sin embargo, dados los valores de máxima conservación obtenidos para cada tipo de manzana, se concluyó que esto no es así. Por lo tanto, es necesario considerar las pérdidas que se generen en este almacenamiento.

Al analizar los resultados, se identificó una inconsistencia en el modelado del almacenamiento de manzanas Red. Originalmente, el modelo considera que esta variedad puede conservarse en cámaras de atmósfera controlada durante un máximo de 11 meses. Sin embargo, dado que el alcance temporal del estudio es de 12 meses y el modelo comienza en el momento cero, estos dos períodos coinciden en la práctica.

Como resultado, el modelo almacena las manzanas durante todo el horizonte de estudio sin computar pérdidas, ya que la descomposición ocurriría en el mes 13, que quedaría fuera del período analizado. Si el modelo fuera cíclico, estas pérdidas se considerarían en el siguiente ciclo. No obstante, dado que el horizonte de estudio y el período de almacenamiento máximo coinciden, el modelo permite conservar la fruta durante los 12 meses sin registrar pérdidas, lo que genera una representación inexacta del deterioro real.

Para representar el efecto de la pérdida de esta variedad de manzanas debido a tiempos de almacenamiento excesivamente largos, y tomando como referencia una nueva fuente [10], se modificó el valor del parámetro α . Se supuso un almacenamiento máximo para esta variedad en atmósfera controlada de 10,5 meses. La fuente anterior sugería una conservación de hasta 11 meses en este tipo de almacenamiento, mientras que la nueva fuente indica que el almacenamiento máximo es de entre 9 y 10 meses. Por lo tanto, se tomó 10,5 meses como un punto medio entre ambas fuentes.

Dado que el modelo considera un horizonte de 12 meses, no resulta viable almacenar este tipo de manzanas hasta el final del período, ya que las pérdidas se contabilizarían igualmente al llegar al mes 12. Esto permite que las pérdidas se generen en el último mes, lo que hace inviable almacenar cualquier variedad de manzana durante todo el período considerado.

Por último, al analizar los resultados de la implementación se observó que el modelo vendía manzanas al supermercado que habían sido extraídas de la cámara de atmósfera controlada hace más de dos meses al momento de la venta. Se detectó un error en los índices del parámetro Q_{tot} , ya que este no consideraba el índice j . Esto no permitía incorporar la trazabilidad de los

tiempos de almacenamiento en cada cámara como requisito de calidad del cliente. Se corrigió el modelo y se condujo a una re-implementación de la solución obtenida, con la cual se realizaron los análisis de sensibilidad y se extrajeron las conclusiones.

Todos los casos de validación no mencionados en esta sección se ejecutaron satisfactoriamente, devolviendo resultados acordes a los supuestos. Por este motivo, dichos análisis no implicaron modificaciones adicionales en el modelado.

8. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos utilizando la metodología descrita en 3.4 para la generación de la frontera de Pareto. Se realiza una interpretación de la frontera de Pareto generada y del comportamiento del modelo.

8.1. Ejecución del modelo matemático

Se decidió implementar el modelo matemático multiobjetivo haciendo uso de la metodología “ ϵ -constraint” para construir una frontera de Pareto que permita la selección de diferentes combinaciones de margen económico y pérdidas generadas, llevando a una mayor versatilidad en la aplicación de los resultados del modelo. Se siguió la metodología de acuerdo con [3] y [5].

En todos los casos se utilizó el lenguaje de modelado matemático AMPL y el solver Gurobi, utilizando un gap de optimalidad de 0 %. Las ejecuciones fueron realizadas en una computadora de características Intel^R CoreTMi5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz. No se utilizó límite de tiempo de ejecución, obteniendo tiempos de ejecución de hasta 2 segundos.

8.2. Construcción de la frontera de Pareto

Dado que se tienen dos funciones objetivo, se comenzó optimizando cada una de ellas de forma independiente. Este enfoque permitió identificar los escenarios críticos:

- El primer escenario corresponde al óptimo de la función objetivo que maximiza el margen. Llamemos M_0 al valor óptimo para la función de margen.
- El segundo escenario representa el óptimo de la función objetivo que minimiza las pérdidas. Llamemos P_0 al valor óptimo de la función de pérdidas.

A partir de estos valores, se ejecutaron de nuevo las optimizaciones individuales de cada función objetivo, pero esta vez sujeto a que el valor de la función objetivo que no está siendo optimizada sea igual al valor óptimo calculado anteriormente. Es decir, se obtiene un valor óptimo para las pérdidas sujeto al valor M_0 para el margen, al cual llamamos P_{M_0} . De la misma forma, se obtiene un valor óptimo para el margen sujeto al valor P_0 para las pérdidas generadas, al que llamamos M_{P_0} . De esta forma, se tienen los dos puntos base para la construcción de la frontera de Pareto, dados por (M_0, P_{M_0}) y (M_{P_0}, P_0) .

Para la obtención del resto de puntos que conforman la frontera de Pareto, se realizó el siguiente procedimiento esquematizado en la Figura 12:

1. Se calculó la diferencia entre el valor óptimo de la función que minimiza las pérdidas y el valor de pérdidas asociado al óptimo de la función que maximiza el margen. Es decir $D_P = |P_0 - P_{M_0}|$. Se realizó lo mismo para el margen, calculando la diferencia entre el valor óptimo de margen, y el valor de margen obtenido a partir de la minimización de pérdidas, $D_M = |M_0 - M_{P_0}|$
2. Ambas diferencias se dividieron entre 10, obteniendo los incrementos en los que se va aumentar (o disminuir en el caso de la restricción de pérdidas) las restricciones a imponer sobre la función que no se optimiza. Por lo tanto, en cada ejecución la restricción va a ser más “fuerte”, obligando a mejorar el objetivo relegado de manera incremental.
3. Con base en estos incrementos, se determinaron 10 restricciones a imponer para el valor de las funciones que no se optimizan. Estas restricciones van a aproximar 10 posibles puntos de la frontera de Pareto.

4. Realizando la optimización de las funciones, con sus respectivas restricciones sobre el objetivo relegado, se encuentran 10 puntos. Aquellos puntos dominantes, es decir que no pueden mejorar uno de los objetivos sin empeorar el otro, son los que pertenecen a la frontera de Pareto.

En la Tabla 3 se presentan en el punto 0 los puntos (M_0, P_{M_0}) y (M_{P_0}, P_0) , respectivamente. En los siguientes puntos se presentan los valores obtenidos al ir imponiendo restricciones sobre el objetivo relegado, de acuerdo con los incrementos determinados. En la Tabla 4 se presentan las restricciones impuestas para cada uno de los puntos, dependiendo de la función objetivo a optimizar.

Tabla 3: Valores obtenidos en la implementación al optimizar cada una de las funciones, e imponiendo restricciones sobre las funciones relegadas.

Punto	Objetivo: maximizar margen		Objetivo: minimizar pérdidas	
	P_{M_0} (toneladas)	M_0 (\$, millones)	P_0 (toneladas)	M_{P_0} (\$, millones)
0	515,4	67,82	514,4	67,51
1	514,9	67,75	514,6	67,54
2	514,9	67,75	514,6	67,57
3	514,9	67,75	514,6	67,60
4	514,9	67,75	514,9	67,63
5	514,9	67,75	514,9	67,67
6	514,6	67,62	514,9	67,70
7	514,6	67,62	514,9	67,73
8	514,6	67,62	515,4	67,76
9	514,4	67,51	515,4	67,79
10	514,4	67,51	515,4	67,82

Tabla 4: Restricciones impuestas para la construcción de la frontera de Pareto.

GAP		
Pérdidas (kg)		1.005
Margen (\$, miles)		314,9
Incrementos		
Pérdidas (kg)		101
Margen (\$, miles)		31,5
Objetivo	Maximizar margen	Minimizar pérdidas
Restricción	Pérdidas (toneladas) $\leq$	Margen (\$, millones) $\geq$
1	515,3	67,54
2	515,2	67,57
3	515,1	67,60
4	515,0	67,63
5	514,9	67,67
6	514,8	67,70
7	514,7	67,73
8	514,6	67,76
9	514,5	67,79
10	514,4	67,82

A partir de estos cálculos se obtuvieron dos series de puntos, generadas por la optimización de ambas funciones de manera independiente, imponiendo las respectivas restricciones (puntos

1-9 de la Tabla 3). En la Figura 16 se observan los puntos obtenidos a partir de la metodología. En celeste se presentan los puntos obtenidos al optimizar el margen y en rosado los puntos obtenidos al optimizar las pérdidas.

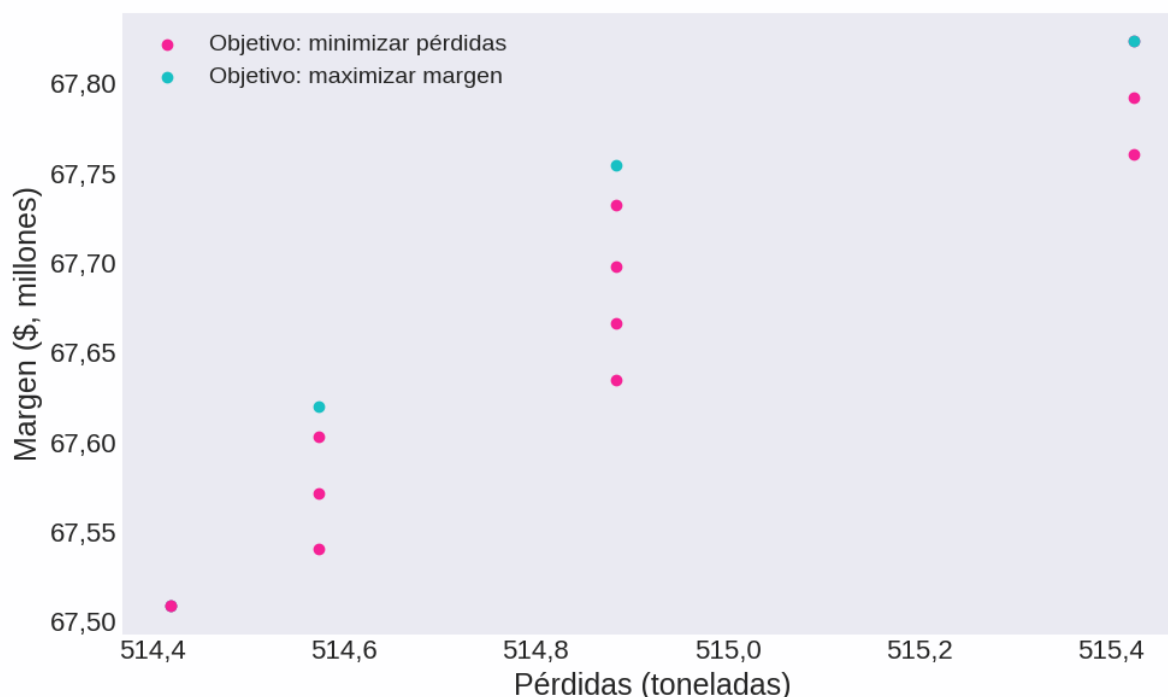


Figura 16: Puntos obtenidos a partir de la metodología para aproximar la frontera de Pareto.

El comportamiento de la función que maximiza el margen es acorde a lo esperado, donde el margen disminuye a medida que se exigen valores de pérdidas menores. De forma similar, el comportamiento de la función que minimiza las pérdidas sigue la misma tendencia de aumentar las pérdidas generadas a medida que se aumenta el margen reportado. Sin embargo, para algunos de los puntos analizados, al imponer una condición más restrictiva sobre el margen las pérdidas se mantienen constantes respecto al punto anterior. Esto implica que ciertos puntos en el espacio de soluciones pueden ser dominados por otros más restrictivos, lo que significa que no pertenecen a la frontera de Pareto. En cambio, estos puntos representan resultados subóptimos dentro del espacio de soluciones posibles.

Este comportamiento puede explicarse por los cambios en la estrategia de almacenamiento adoptada por el modelo. A medida que aumenta la restricción sobre el margen, el sistema opta por conservar una mayor cantidad de fruta en cámaras convencionales sin incurrir en pérdidas adicionales. De este modo, la cámara de atmósfera controlada tiende a vaciarse más rápidamente, mientras que las cantidades de frutas conservadas en cámaras convencionales aumentan de manera más temprana. Además, para las pérdidas inevitables, el modelo prioriza que estas se concentren en las cámaras convencionales cuando se requiere un margen mayor, en lugar de en las cámaras de atmósfera controlada. De esta forma se puede mantener el mismo valor de pérdidas, abaratando costos de almacenamiento. Esto genera fruta de peor calidad (aunque aún apta para consumición) a la vez que aumenta el margen operativo debido a ahorros significativos en costos de almacenamiento.

Como resultado, se obtienen diferentes combinaciones de margen para un mismo nivel de pérdidas, lo que explica la presencia de puntos dominados. Estos puntos reflejan configuraciones menos eficientes y, por lo tanto, no forman parte de la frontera de Pareto, que únicamente incluye las soluciones no dominadas que optimizan simultáneamente ambas funciones objetivo.

Para estos puntos sí es posible mejorar uno de los objetivos (aumentar el margen) sin empeorar el otro (misma cantidad de pérdidas); por lo tanto, quedan excluidos del frente de Pareto, por definición.

Otra conclusión a partir de este comportamiento es que la afectación de la calidad en el precio juega un papel menor que la diferencia de costos de almacenamiento cuando se quiere maximizar el margen. Se prefiere tener fruta con calidad peor, aunque todavía vendible a un precio menor, antes que almacenar por tiempos más prolongados en cámaras de atmósfera controlada.

La frontera de Pareto queda conformada por los puntos a partir de los cuales no se puede mejorar una función sin empeorar la otra. En este caso, esos puntos fueron obtenidos a partir de la optimización de la función de margen, la cual en todos los casos es la función que domina el sistema.

En la Figura 17 se presentan los puntos que conforman la frontera de Pareto y, superpuesta, una interpolación por splines cúbicos. Esta interpolación es una aproximación del comportamiento de la frontera, pero no se asegura que represente soluciones factibles más allá de las halladas durante la implementación, ya que la interpolación es simplemente un ajuste matemático para crear una curva suave que conecte los puntos de control. No considera explícitamente las restricciones o las relaciones de factibilidad del problema.

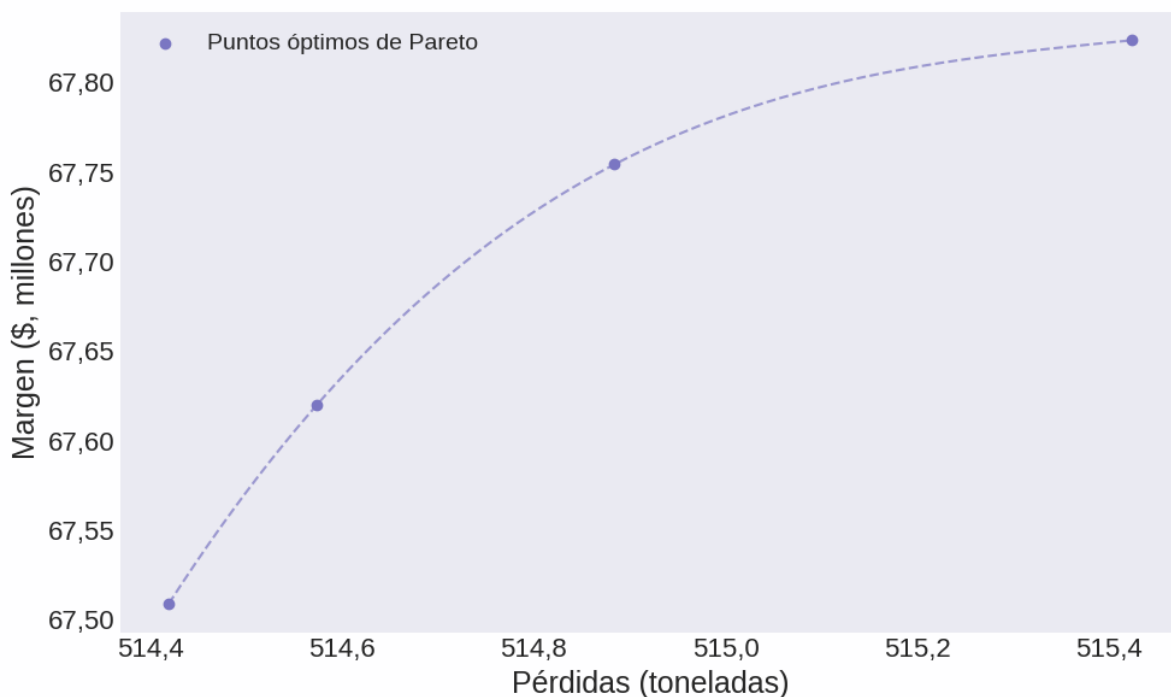


Figura 17: Frontera de Pareto generada.

8.3. Interpretación de resultados

Los resultados indican que, para los datos analizados, la variación en el margen es mayor que en las pérdidas. Si bien ambos valores presentan gaps relativamente pequeños en términos absolutos, en términos relativos, la variación en el margen es más del doble que en las pérdidas, lo que sugiere que el sistema es más sensible a este factor.

Esto es esperable, ya que la única forma de evitar pérdidas es a través de la venta de la fruta. Al optimizar el margen, el modelo selecciona las estrategias de venta y conservación más eficaces

para maximizar los beneficios. Además, dentro de este objetivo se incluye la minimización del desperdicio, dado que cada unidad de fruta deteriorada representa una oportunidad de venta perdida.

Dado que las diferencias en las pérdidas son menores, para el análisis de resultados se tomó el punto de máximo margen. Los resultados presentados a continuación nacen del análisis del comportamiento de este punto.

Para el caso de margen óptimo, relegando las pérdidas, se obtiene un margen de \$67,82 millones teniendo 515,4 toneladas de pérdidas. Este resultado se logra vendiendo en todos los periodos toda la fruta demandada por los clientes. Además, el sistema opta por la mano de obra con mayor grado de capacitación. El comportamiento del modelo se presenta de manera esquemática en la Figura 18.

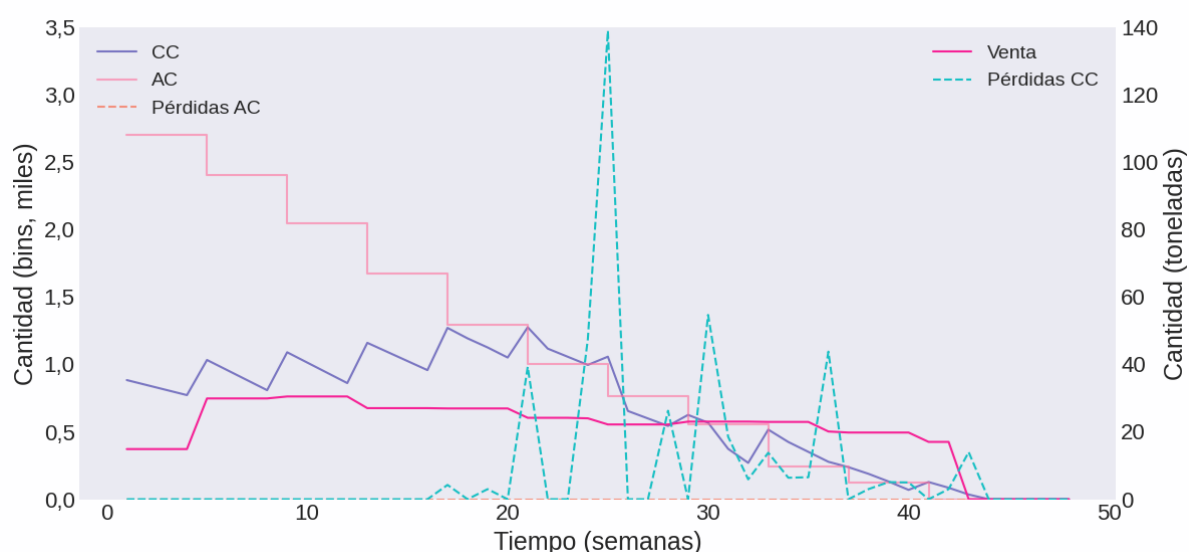


Figura 18: Resumen del comportamiento del sistema para el punto de máximo margen.

No se perciben pérdidas en cámara de atmósfera controlada. Se mantiene un nivel de fruta estable en cámara convencional hasta la semana 25 aproximadamente, a partir de la cual la cantidad conservada disminuye hasta ser nula en la semana 43. En cuanto a la cámara de atmósfera controlada, ésta se abre según lo que se presenta en la Tabla 5. Los momentos de apertura de las cámaras se ajustan a las tasas de deterioro de cada variedad. La variedad Red se extrae de cámara de atmósfera controlada todos los periodos excepto el primero y último, lo cual tiene sentido debido a su alta demanda y tasa de deterioro pequeña. Por otro lado, la variedad Gala tiene una demanda significativamente menor, así como tasas de deterioro mayores, y se abre una única vez, en los periodos iniciales. Para las Cripps Pink se da la particularidad de que se saca de atmósfera controlada cada período intercalado, y además siempre el lote mínimo. Esto se puede interpretar como que la demanda es importante como para abrir frecuentemente la cámara, pero no tanto para justificar extraer cantidades mayores al lote mínimo. La cantidad de fruta conservada al final del estudio es nula, lo cual es esperable en un modelo de inventario con ventas y costos.

Las pérdidas de 515,4 toneladas están compuestas por pérdidas de 75,5 toneladas en la cosecha, y 438,9 toneladas en packing. Esto es, las pérdidas representan un 34 % del total potencial de cosecha, de las cuales hay un 5 % que se pierde en la cosecha, y un 29 % en el packing. Las pérdidas en packing en relación con lo que ingresa son del 31 %. Estos valores son altos, en especial considerando las referencias bibliográficas presentadas. En particular, en el

Tabla 5: Cantidad de bins de cada variedad que se extraen de cámara de atmósfera controlada a lo largo del tiempo.

Semana	Variedad		
	Cripps Pink	Red	Gala
1	0	0	0
5	0	178	0
9	120	236	120
13	0	255	0
17	120	261	0
21	0	172	0
25	120	120	0
29	0	203	0
33	120	199	0
37	0	120	0
41	0	120	0
45	0	0	0

estudio [7], se estimó que las pérdidas en packing pueden ser de hasta el 20 % de lo que ingresa.

Del comportamiento observado en el modelo, a partir de las soluciones obtenidas por la minimización de pérdidas se nota que hay una cantidad de fruta que no es posible evitar perder. De esto se deduce que la oferta es significativamente superior a la demanda. La demanda fue estimada considerando un 3 % del mercado, y para la cantidad de árboles se tomó el 3 % de los árboles en el país. Este comportamiento parece mostrar que la relación entre la demanda percibida y la disponibilidad de árboles no es lineal, y que para el caso de una tasa del 3 % del mercado, la oferta tuvo que haber sido porcentualmente menor para estar ajustada. Esto no significa que no se puedan extraer conclusiones de los resultados; sin embargo, es fundamental tener en cuenta este factor al interpretar la información derivada de los datos obtenidos, ya que su alcance puede verse limitado por esta consideración.

En la Tabla 6 se presentan las pérdidas por calibre y variedad. Del calibre chico se pierde prácticamente la totalidad de la cosecha, vendiéndose solamente el 0,13 % de lo cosechado. Este resultado implica que casi toda la fruta que se cosecha de este calibre se pierde. Esto puede variar dependiendo de la relación oferta-demanda, como ya se explicó. Una observación que se mencionó en varias de las entrevistas es que los calibres chicos se descartan al momento de clasificar en el packing. Viendo este comportamiento, es cuestionable si no resulta conveniente hacer una clasificación por calibres previo a la conservación en atmósfera controlada. Esto tendría dos beneficios:

1. Se ahorraría el costo de almacenar fruta que luego no se va a vender.
2. Los descartes que se realicen durante la cosecha se pueden destinar a sidrería o jugueras, logrando utilizar la fruta con otro propósito y obteniendo algún beneficio económico, por más que el precio de venta a estas industrias sea bajo.

De los otros calibres se pierde un 29 % del calibre medio, y el calibre que percibe menores pérdidas es el calibre grande, del que se pierde el 8 % de lo cosechado. Al analizar estos resultados se debe tener en cuenta que el calibre mediano es el que se tiene en mayor cantidad, mientras que los calibres chicos y grandes representan cantidades de fruta menores. En la Figura 19 se presenta el esquema del comportamiento obtenido, diferenciado por calibre.

En cuanto a variedades, la variedad que más pérdidas presenta es Cripps Pink, con pérdidas del 62 % de lo cosechado. Las pérdidas de las Cripps Pink representan el 53 % de las pérdidas totales en packing. La oferta de las Cripps Pink supera ampliamente la demanda. Por otro lado,

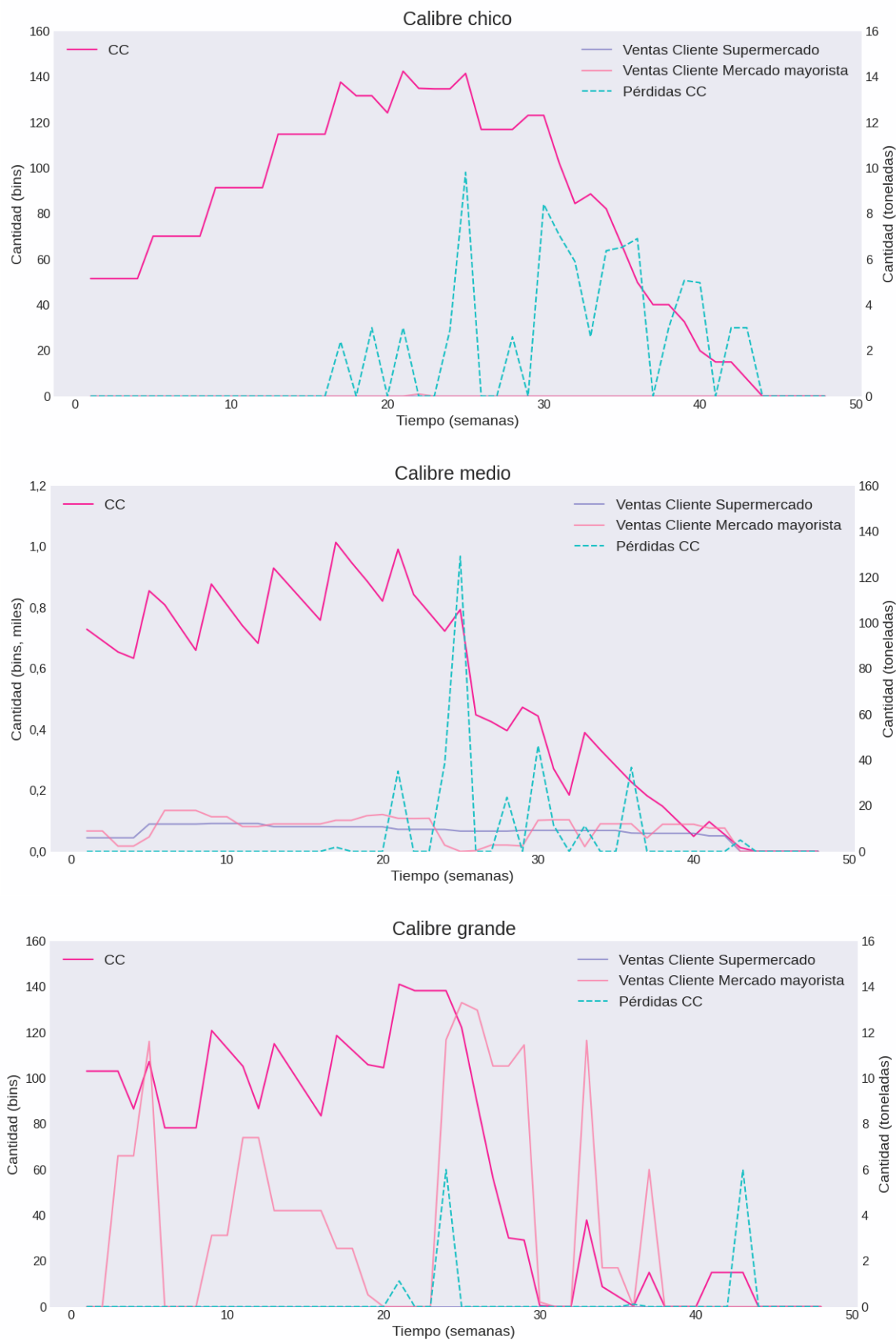


Figura 19: Resultados de la implementación por calibres.

de las Galas también hay pérdidas importantes de lo cosechado, 52 %, y de las Reds se pierde 13 %, concluyendo que esta última es la variedad más ajustada a la demanda. La Figura 20 muestra el comportamiento del sistema discriminando según las variedades.

Tabla 6: Pérdidas en packing por calibre y variedad.

Variedad	Calibre (toneladas)			Total (toneladas)
	Chico	Mediano	Grande	
Cripps Pink	20,2	212,2	0,1	232,6
Reds	55,0	51,2	6,0	112,3
Gala	11,3	75,6	7,1	94,1
Total (toneladas)	86,5	339,1	13,2	438,9
Pérdidas por calibre (%)	100	29	8	

Variedad	Pérdidas por variedad (%)	Pérdidas por variedad en packing (%)
Cripps Pink	62	53
Reds	13	26
Gala	52	21

Al descomponer las ventas, el comportamiento se puede analizar distinguiendo entre calibres o variedades. Las ventas de las Galas ocurren en un período corto, aproximadamente 20 semanas. Tienen un pico entre las semanas 5 y 15, y luego disminuyen rápidamente. Las ventas de las Cripps Pink y Reds son estables a lo largo del tiempo, las Reds con mayor magnitud que las Cripps Pink. Al analizar el comportamiento por calibre, se observa que el calibre pequeño prácticamente no genera ventas. El calibre grande se destina únicamente al mercado mayorista. El calibre mediano, por su parte, se vende tanto al supermercado como al mercado mayorista, siendo utilizado para satisfacer la demanda total del supermercado. Sin embargo, las ventas del calibre mediano al mercado mayorista son más irregulares, ya que parte de esta demanda se cubre con manzanas de calibre grande.

El total de las ventas por cliente se presenta en la Tabla 7. Al analizar los datos por variedad, se ve que la única variedad de la que se vende calibre chico es la Gala. La variedad más demandada es la Red, seguida por las Cripps Pink. Al comparar la venta de variedades por cliente en términos porcentuales, la relación es prácticamente igual. No hay una distinción entre la proporción de las variedades que se venden a cada uno (ver Tabla 7).

Tabla 7: Ventas obtenidas por calibre, variedad y cliente.

Cliente: Supermercado					
Variedad	Calibre (toneladas)			Total (toneladas)	% Venta al cliente
	Chico	Mediano	Grande		
Cripps Pink	0,0	56,0	0,0	56,0	14
Reds	0,0	307,2	0,0	307,2	77
Gala	0,0	35,3	0,0	35,3	9
Total (toneladas)	0,0	398,5	0,0	398,5	

Cliente: Mercado mayorista					
Variedad	Calibre (toneladas)			Total (toneladas)	% Venta al cliente
	Chico	Mediano	Grande		
Cripps Pink	0,0	43,7	40,4	84,1	14
Reds	0,0	356,7	104,0	460,8	77
Gala	0,1	37,2	15,7	52,9	9
Total (toneladas)	0,1	437,5	160,1	597,7	

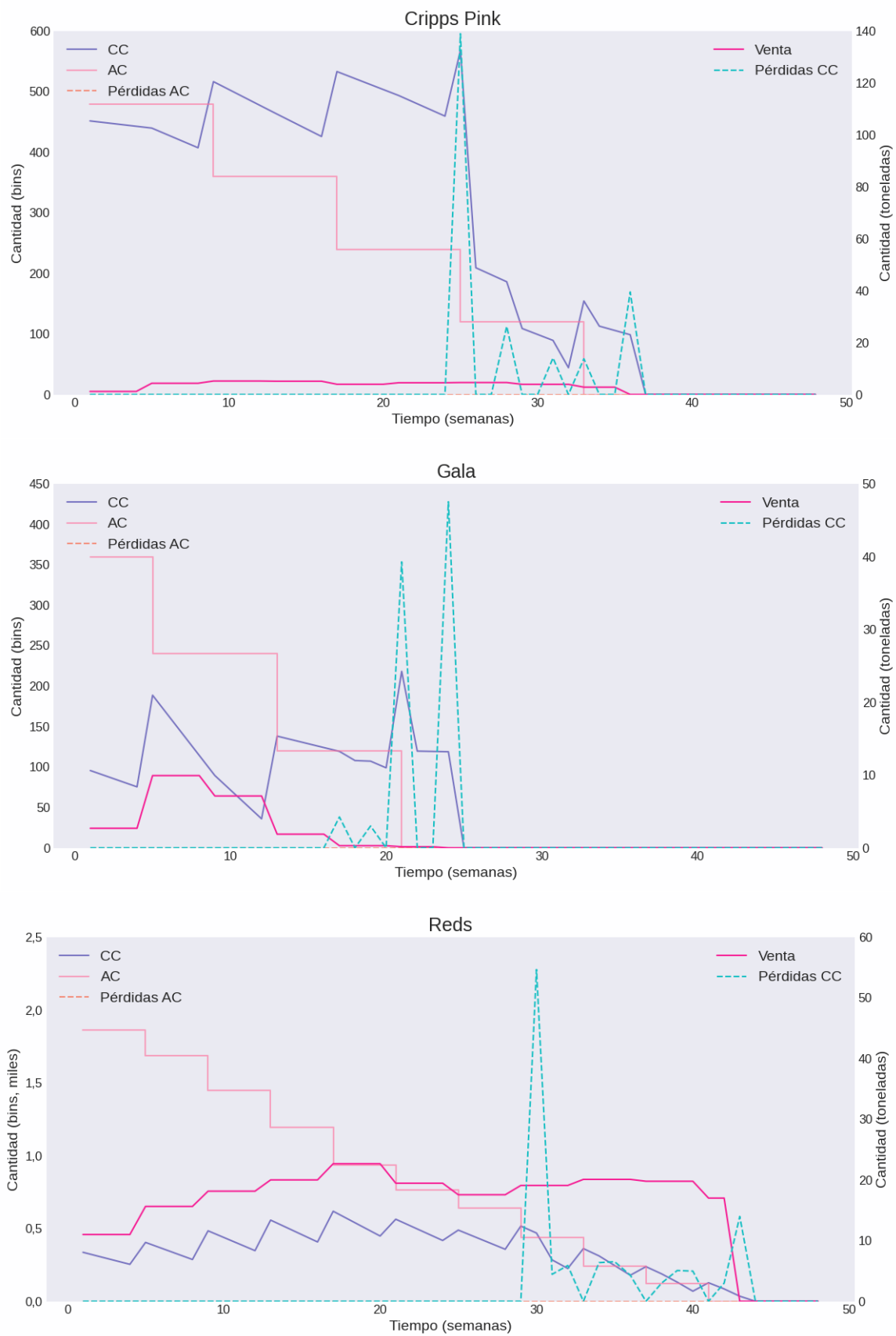


Figura 20: Resultados de la implementación por variedades.

9. Análisis de sensibilidad

En este capítulo se realizó un análisis de cómo las variaciones en los parámetros clave del modelo afectan los resultados. Se evaluaron diferentes escenarios para identificar los parámetros más influyentes y se realizaron pruebas de sensibilidad para cada uno. Además, se presentan los resultados obtenidos de estas pruebas y se discuten sus implicaciones para la precisión y la fiabilidad del modelo.

9.1. Análisis de sensibilidad sobre los precios de venta

El objetivo es analizar la sensibilidad del modelo ante variaciones en los precios de venta de las manzanas. Debido a que el mercado mayorista de las frutas y hortalizas se rige por la ley de la oferta y la demanda, los precios varían semana a semana. Esta característica hace que la variación en los precios sea todavía más frecuente que en otro tipo de mercados donde las condiciones de compra-venta están establecidas en contratos. Por otro lado, pese a establecer las condiciones de compra-venta de antemano por contrato, los supermercados también se rigen por la ley de oferta y demanda, de modo que pueden variar los precios que están dispuestos a pagar, aunque con menos regularidad que el mercado mayorista.

Se analizaron dos casos de variación de precio: aumentos durante los primeros 6 meses después de realizada la cosecha, y aumentos del mes 7 en adelante. De esta forma, es posible analizar si hay variaciones en la estrategia de almacenamiento y ventas ante valores de precios variantes durante el ciclo considerado. Para los casos de análisis se consideraron aumentos del 5, 10 y 20 % dentro de los primeros 6 meses después de la cosecha y luego de los 6 meses, tanto para el mercado mayorista como para el supermercado. Esto dio lugar a los 12 escenarios descritos en la Tabla 8. Los resultados de cada uno de estos casos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 8: Escenarios de aumento de precios de venta para el mercado mayorista y el supermercado.

Caso	Descripción
0	Caso base
1	Aumento precios de venta 5 % del mes 7 en adelante para mercado mayorista
2	Aumento precios de venta 10 % del mes 7 en adelante para la mercado mayorista
3	Aumento precios de venta 20 % del mes 7 en adelante para la mercado mayorista
4	Aumento precios de venta 5 % durante los primeros 6 meses para la mer. mayorista
5	Aumento precios de venta 10 % durante los primeros 6 meses para la mer. mayorista
6	Aumento precios de venta 20 % durante los primeros 6 meses para la mer. mayorista
7	Aumento precios de venta 5 % del mes 7 en adelante para el supermercado
8	Aumento precios de venta 10 % del mes 7 en adelante para el supermercado
9	Aumento precios de venta 20 % del mes 7 en adelante para el supermercado
10	Aumento precios de venta 5 % durante los primeros 6 meses para el supermercado
11	Aumento precios de venta 10 % durante los primeros 6 meses para el supermercado
12	Aumento precios de venta 20 % durante los primeros 6 meses para el supermercado

Del análisis es posible ver cómo las pérdidas generadas no varían en ningún caso con respecto a la implementación original. Como es de esperarse, a mayor aumento de los precios de venta, mayor es el aumento en el beneficio reportado. Sin embargo, es importante notar que el aumento de precio durante la segunda mitad del período de venta es mayor que el aumento equivalente durante los primeros 6 meses. Esto se explica debido a que los precios durante la segunda mitad del año son mayores que los de la primera mitad.

La mejora en el resultado es más significativa cuando el aumento de precios de venta ocurre en el mercado mayorista, en comparación con el mismo aumento en el supermercado. Esto se

Tabla 9: Análisis de sensibilidad de los precios de venta.

Caso	Máx. margen		Variación	
	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Margen (%)	Pérdidas (%)
0	515,4	67,82	0	0
1	515,4	68,81	1	0
2	515,4	69,79	3	0
3	515,4	71,77	6	0
4	515,4	69,21	2	0
5	515,4	70,59	4	0
6	515,4	73,36	8	0
7	515,4	68,67	1	0
8	515,4	69,51	2	0
9	515,4	71,20	5	0
10	515,4	68,98	2	0
11	515,4	70,14	3	0
12	515,4	72,46	7	0

debe a que el mercado mayorista representa una mayor proporción de la demanda percibida. Al tratarse de una mayor demanda, esto implica un incremento más significativo en el margen, a pesar de que los precios de venta en el mercado mayorista son menores.

Debido al sobredimensionamiento de la oferta, el cambio en los precios de venta no representa un cambio en la estrategia de almacenamiento y ventas, ya que siempre se tiene oferta disponible para satisfacer la demanda en todos los períodos. En casos donde la demanda está más ajustada a la oferta, las variaciones en los precios de venta podrían implicar cambios en las ventas, dado que sería más beneficioso conservar la fruta almacenada para venderla cuando los precios del mercado sean mayores, aunque esto implique una venta de fruta a menor calidad. Sin embargo, para las dimensiones del problema, el análisis demuestra que aumentos de hasta el 20 % en los precios de venta no representan una variación en la generación de pérdidas, aunque devuelven resultados económicos más favorables.

9.2. Análisis de sensibilidad sobre las tasas de deterioro de calidad por almacenamiento

La sensibilidad del modelo frente al deterioro de las manzanas durante su conservación está determinada por las tasas α y β (tasas de deterioro de calidad por almacenamiento en cámaras de atmósfera controlada y de almacenamiento convencional, respectivamente). Para la implementación principal, estos datos fueron calculados a partir de fuentes bibliográficas que indican el máximo tiempo de conservación de los distintos tipos de manzana en los diferentes tipos de almacenamiento.

Los valores utilizados para este análisis se pueden ver en la Tabla 10. Para los escenarios realizados, se consideraron condiciones de almacenamiento más restrictivas. De esta forma, se recalcularon estas tasas suponiendo que las manzanas tienen una conservación máxima menor que la supuesta para el caso base. Se realizaron entonces tres escenarios: uno de ellos en el que se recalculó el parámetro α , suponiendo que cada variedad de manzana soporta un mes menos de lo inicialmente supuesto en la cámara de almacenamiento de atmósfera controlada. En el siguiente escenario, se volvió a recalcular α , suponiendo conservaciones de dos meses menos en este tipo de almacenamiento. Por último, se analizó qué ocurre en caso de que el almacenamiento en cámara convencional sea más restrictivo, por lo que, para este último caso, se recalculó el parámetro β , suponiendo una conservación de dos meses menos respecto al caso base en este tipo de almacenamiento.

Tabla 10: Resultados de α y β por variedad y caso.

Caso	Variedad	α (%)	Meses conserv.	β (%)	Meses conserv.
Caso 0	Cripps Pink	2,78	9	4,17	6
(Caso base)	Red	2,38	10,5	3,57	7
	Gala	4,17	6	6,25	4
Caso 1	Cripps Pink	3,13	8	4,17	6
(1 mes menos)	Red	2,63	9,5	3,57	7
	Gala	5,00	5	6,25	4
Caso 2	Cripps Pink	3,57	7	4,17	6
(2 meses menos)	Red	2,94	8,5	3,57	7
	Gala	6,25	4	6,25	4
Caso 3	Cripps Pink	2,78	9	6,25	4
(2 meses menos)	Red	2,38	10,5	5,00	5
	Gala	4,17	6	12,50	2

Los resultados de estos tres casos de análisis se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11: Análisis de sensibilidad de las tasas de deterioro de calidad por almacenamiento.

Caso	Max. margen		Variación	
	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Pérdidas (%)	Margen (%)
0	515,4	67,82	0	0
1	625,7	59,62	21	-12
2	718,4	51,81	39	-24
3	555,7	64,02	8	-6

Como se puede observar en la Tabla 11, el modelo es extremadamente sensible a variaciones en estos parámetros. Una disminución de dos meses en el almacenamiento en cámara convencional genera un 8 % más de pérdidas respecto al caso base, mientras que dos meses en el almacenamiento de cámara de atmósfera controlada generan un aumento del 39 %. Cuanto mayor es la variación del parámetro, mayores son los efectos negativos en los resultados, como se observa en la comparación entre el caso 1 y el caso 2, donde aumenta aún más la generación de pérdidas, a la vez que la diferencia porcentual entre los márgenes obtenidos se vuelve más negativa.

Es posible concluir que el almacenamiento en cámaras de atmósfera controlada es más crítico que el almacenamiento en cámaras convencionales. En consecuencia, la rigurosidad en la determinación de los parámetros de almacenamiento de atmósfera controlada es un factor clave. Es fundamental que cada productor, a partir de su experiencia, conozca las condiciones y el estado de almacenamiento que puede alcanzar dentro de sus cámaras, para realizar estimaciones más precisas sobre las tasas de descomposición de la fruta durante su conservación. Cuanto más precisas sean estas estimaciones, más fiel será el resultado devuelto por el modelo a la realidad.

9.3. Análisis de sensibilidad sobre la distribución de calibres en los bins

La sensibilidad del modelo ante los distintos calibres de manzana considerados está determinada por el parámetro γ . Este parámetro define qué porcentaje de las manzanas de un bin estándar corresponde a cada calibre. Asume que, para una misma variedad, la distribución de los calibres es uniforme en todos los bins de esa variedad, pero se considera que las distribuciones pueden variar entre las diferentes variedades.

Se consideraron tres casos para los análisis de sensibilidad relacionados con este parámetro. En cada uno de ellos se modificó la distribución de calibres de una de las variedades. La idea

detrás de estos casos es que las distribuciones de calibres sean más restrictivas que las establecidas en el caso base. Por lo tanto, se disminuyó significativamente la cantidad de manzanas de calibre intermedio, lo que incrementó las proporciones de manzanas de calibres pequeño y grande. Este escenario es de interés porque el cliente supermercado solamente acepta manzanas de calibre intermedio. Una disminución abrupta en la oferta de este calibre podría impactar en términos de ventas, repercutiendo en los resultados económicos percibidos por el productor. En la Tabla 12 se muestran las perturbaciones realizadas sobre el parámetro γ .

Tabla 12: Distribución porcentual por variedad, caso y calibre.

Variedad	Caso base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Reds	Chico: 6,25 % Mediano: 81,25 % Grande: 12,50 %	Chico: 20,00 % Mediano: 50,00 % Grande: 30,00 %	Chico: 6,25 % Mediano: 81,25 % Grande: 12,50 %	Chico: 6,25 % Mediano: 81,25 % Grande: 12,50 %
Cripps Pink	Chico: 5,43 % Mediano: 83,70 % Grande: 10,87 %	Chico: 5,43 % Mediano: 83,70 % Grande: 10,87 %	Chico: 5,43 % Mediano: 83,70 % Grande: 10,87 %	Chico: 20,00 % Mediano: 50,00 % Grande: 30,00 %
Gala	Chico: 6,25 % Mediano: 81,25 % Grande: 12,50 %	Chico: 6,25 % Mediano: 81,25 % Grande: 12,50 %	Chico: 20,00 % Mediano: 50,00 % Grande: 30,00 %	Chico: 6,25 % Mediano: 81,25 % Grande: 12,50 %

A partir de la ejecución de los tres casos, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 13.

Tabla 13: Análisis de sensibilidad de la distribución de calibres en los bins.

Caso	Max. margen		Variación	
	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Pérdidas (%)	Margen (%)
0	515,4	67,82	0	0
1	515,4	67,74	0	-0,1
2	515,4	69,14	0	0,5
3	515,4	68,46	0	1

De los casos ejecutados, es posible analizar cómo, al pasar de una distribución estándar de calibres a una distribución más restrictiva, los resultados permanecen prácticamente invariables.

El análisis está influenciado por la relación desproporcionada entre la oferta y la demanda del modelo implementado. Dado que la oferta supera a la demanda, al cambiar la proporción de los calibres, el resultado no varía. Las pérdidas se mantienen constantes, ya que, aunque disminuya la proporción de manzanas medianas, esto solo afecta la capacidad de venta al supermercado. Al reducir la cantidad de manzanas Red de calibre medio, las cuales están correctamente ajustadas a la demanda, el margen disminuye. Esto se debe a que se reduce el potencial de venta al supermercado, que ofrece los precios más altos. Por otro lado, al disminuir el calibre medio de las manzanas Cripps Pink y Gala, el margen aumenta. Esto puede deberse a que hay una mayor proporción de manzanas grandes, las cuales tienen un precio de venta más alto en el mercado mayorista. Además, estas variedades no representan la mayor parte de las ventas, como ocurre con la variedad Red.

9.4. Análisis de sensibilidad sobre la calidad máxima inicial

Es de interés analizar la toma de decisiones del modelo en relación a la mano de obra. En este análisis, se estudia el impacto de los diferentes niveles de calidad máxima inicial (Q_{max}) de la fruta, asociados a los diferentes grados de capacitación de la mano de obra (MO). El objetivo es analizar cómo varían los resultados del modelo a medida que se modifican los valores de

Qmax para cada nivel de mano de obra. Los casos y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 14, siendo la última columna el grado de mano de obra seleccionado, donde 1 es el grado de menor capacitación, y 3 el grado de mayor nivel de capacitación.

El caso base considera los siguientes valores del parámetro Qmax: 87,5 % para la cuadrilla zafra, 95 % para la cuadrilla estable y 100 % para el personal fijo de la quinta.

Tabla 14: Variación de Qmax, pérdidas, margen y MO.

Caso	Qmax (%)			Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	MO
	MO 1	MO 2	MO 3			
0	87,5	95	100	515,4	67,82	3
1	95	95	100	515,4	67,82	3
2	90	95	100	515,4	67,82	3
3	87,5	97,5	100	532,6	68,34	2
4	87,5	95	97,5	532,6	65,62	3
5	87,5	95	95,5	574,2	64,28	2

A partir de los datos obtenidos de los cinco escenarios analizados, se pueden extraer las siguientes conclusiones. En los escenarios donde se aumentó la calidad máxima inicial de la mano de obra con menor grado de capacitación, no se observaron cambios en los resultados. Esto sugiere que el nivel de calidad máxima de dicho grado de capacitación de mano de obra no tendría un impacto relevante en las pérdidas ni en el margen cuando se compara con otras opciones.

En el caso 3, al modificar la Qmax de la mano de obra de grado intermedio, el modelo elige esta mano de obra, lo que resultó en un aumento de las pérdidas y un incremento en el margen. Este aumento en las pérdidas se debe a que, en el caso inicial, al elegir la mano de obra más capacitada se considera un 5 % de pérdidas en la cosecha, mientras que en este escenario las pérdidas en cosecha son del 10 %. Además, la calidad máxima inicial pasó de ser 100 % a ser 97,5 %. Por otro lado, se observa un ahorro de alrededor de 2 millones de pesos en el costo de la mano de obra, lo cual es coherente con el cambio en el margen. La diferencia en el margen es de aproximadamente medio millón, lo que indica que, aunque los ahorros en mano de obra contribuyen a un mayor margen, esta elección también conlleva menores volúmenes de venta y precios más bajos.

En el caso 5, donde se disminuyó la Qmax inicial de la mano de obra más capacitada, se optó por la mano de obra intermedia, pues las calidades iniciales son casi iguales, siendo para la mano de obra intermedia 95 % y para la mano de obra de mayor capacitación 95,5 %. Esto resalta la sensibilidad del modelo a los cambios en la calidad inicial de las frutas, lo que influye directamente en la elección de la mano de obra adecuada.

9.5. Análisis de sensibilidad sobre porcentaje de pérdidas y costo de mano de obra

En este análisis, se presenta la evaluación de los casos que resultaron con mayores pérdidas para el tipo de mano de obra (MO) con mayor grado de capacitación. Asimismo, se analizan los efectos de los aumentos en los costos de la mano de obra, especialmente para el tipo de mano de obra más eficiente, con el objetivo de evaluar si se sigue eligiendo este tipo de mano de obra a pesar del aumento en los costos asociados. Los escenarios considerados se muestran en la Tabla 15, y los resultados obtenidos en la Tabla 16.

Se puede concluir que la disminución de las pérdidas en el tipo de mano de obra menos eficiente no justifica su elección. La elección continúa recayendo en la mano de obra que genera menos pérdidas iniciales y mayor calidad inicial, a pesar de que el costo de esta opción sea significativamente mayor.

Tabla 15: Análisis de sensibilidad sobre porcentaje de pérdidas y costo de mano de obra.

Caso	MO 1	MO 2	MO 3
Inicial			
Pérdidas MO (%)	30	10	5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	2,2
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	6,60
Caso 1			
Pérdidas MO (%)	20	10	5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	2,2
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	6,60
Caso 2			
Pérdidas MO (%)	15	10	5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	2,2
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	6,60
Caso 3			
Pérdidas MO (%)	12,5	10	5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	2,2
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	6,60
Caso 4			
Pérdidas MO (%)	30	10	7,5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	2,2
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	6,60
Caso 5			
Pérdidas MO (%)	30	10	9
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	2,2
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	6,60
Caso 6			
Pérdidas MO (%)	30	10	9,5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	2,2
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	6,60
Caso 7			
Pérdidas MO (%)	30	10	5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	2,5
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	7,50
Caso 8			
Pérdidas MO (%)	30	10	5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	3,0
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	9,00
Caso 9			
Pérdidas MO (%)	30	10	5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	4,0
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	12,00
Caso 10			
Pérdidas MO (%)	30	10	5
Jornada MO (\$, miles)	0,85	1,5	3,5
Costo MO (\$, millones)	2,55	4,50	10,50

En los casos de aumento de pérdidas para la mano de obra más eficiente, en ninguno de ellos se opta por elegir la mano de obra intermedia. Es fundamental comprender la importancia de Qmax (calidad máxima inicial de la fruta dado un grado de mano de obra determinado), ya

Tabla 16: Resultados de análisis por caso: Máximo margen, pérdidas y tipo de MO.

Caso	Margen (\$, millones)	Pérdidas (toneladas)	MO Elegida
0	67,82	515,4	3
1	67,82	515,4	3
2	67,82	515,4	3
3	67,82	515,4	3
4	68,15	515,4	3
5	68,34	515,4	3
6	68,40	515,4	3
7	66,92	515,4	3
8	65,42	515,4	3
9	64,28	574,2	2
10	64,28	574,2	2

que, aunque las pérdidas en cosecha sean mayores (casos 7 y 8), se opta por una mano de obra más costosa para minimizar las pérdidas a lo largo del proceso de venta y conservación.

Además, mayores pérdidas en cosecha no implican necesariamente mayores pérdidas operativas, debido a la restricción de apertura de cámaras de atmósfera controlada (lote mínimo). Aunque las pérdidas en cosecha sean mayores, el total de pérdidas no varía porque no se pueden almacenar cantidades que no sean múltiplos del mínimo extraíble.

Por otro lado, sólo se modificó el costo de la mano de obra más eficiente porque es el tipo de mano de obra que el sistema eligió como óptimo. A medida que se aumentó el costo de la mano de obra más eficiente, se observó que solo con un costo mayor al doble de su valor inicial el sistema opta por la mano de obra de grado intermedio (caso 10). Esto tiene sentido, ya que las pérdidas en porcentaje se duplican y el precio también se incrementa más del doble. En conclusión, se prioriza la mano de obra en la mayoría de los escenarios.

9.6. Análisis de sensibilidad sobre las proporciones de las variedades de manzanas

El objetivo de este análisis es, manteniendo la cantidad total de árboles, analizar cómo el cambio en las proporciones entre variedades afecta los resultados. Los casos considerados se muestran a continuación en la Tabla 17, mientras que los resultados obtenidos se pueden visualizar en la Tabla 18. Los casos a destacar de este análisis son el 2, 3 y 4.

En el caso 2, donde se aumenta la proporción de la variedad Red de 57 % a 65 %, aumentan las pérdidas. La venta de las Red está restringida por la demanda, por lo que aumentar su proporción no implica un mayor margen, sino mayores pérdidas. La variedad Gala disminuye su proporción de 18 % a 10 %. Como tenía pérdidas previamente, al disminuir la cantidad de árboles plantados, el modelo se beneficia, aunque no lo suficiente como para contrarrestar el efecto de las Red.

El caso 3, donde se mantienen las Red, aumentan las Cripps Pink y disminuyen las Gala, es similar, ya que no hay mucha demanda de la variedad Cripps Pink, lo que limita su rendimiento en términos de margen.

El caso 4 es el mejor escenario, ya que las Gala aumentan y las Cripps Pink disminuyen, mientras que las Red permanecen constantes. Esto reduce las pérdidas totales, dado que las Reds se mantienen ajustadas a su demanda, y aumenta la proporción de Gala. Estas son la variedad con menor productividad, por lo que la cantidad de manzanas total se reduce, y por tanto disminuyen las pérdidas. Por su parte, las Cripps Pink disminuyen considerablemente sus pérdidas, en un 75 %.

A partir de estos resultados, se deduce que las dimensiones iniciales del problema (cantidad

Tabla 17: Cantidad de árboles plantados por variedad de manzana.

Caso	Dato	Cripps Pink	Red	Gala
0	Porcentaje (%)	25	57	18
	Árboles	21.590	48.712	15.458
1	Porcentaje (%)	25	45	30
	Árboles	21.440	38.592	25.728
2	Porcentaje (%)	25	65	10
	Árboles	21.440	55.744	8.576
3	Porcentaje (%)	35	55	10
	Árboles	30.016	47.168	8.576
4	Porcentaje (%)	20	55	25
	Árboles	17.152	47.168	21.440
5	Porcentaje (%)	17	65	18
	Árboles	14.579	55.744	15.436
6	Porcentaje (%)	37	45	18
	Árboles	31.731	38.592	15.436

Tabla 18: Pérdidas, margen y variación para diferentes distribuciones de variedades.

Caso	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Variación	
			Pérdidas (%)	Margen (%)
0	515,4	67,82	0	0
1	518,3	62,70	1	-8
2	561,0	66,94	9	-1
3	553,8	67,31	7	-1
4	479,7	68,33	-7	1
5	521,5	67,48	1	-1
6	577,5	61,90	12	-9

de árboles plantados) no eran adecuadas. Al reducir las cantidades de árboles de Cripps Pink y aumentar los de Gala (caso 4), el margen aumenta y las pérdidas disminuyen, mejorando ambos objetivos simultáneamente.

9.6.1. Análisis de sensibilidad sobre el total de árboles plantados

A partir del análisis anterior, resulta necesario analizar la reducción de la cantidad total de árboles plantados, dado que existe una discrepancia entre la oferta y la demanda que genera pérdidas inevitables. Los casos considerados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Datos del análisis de sensibilidad sobre el total de árboles plantado.

Caso	Variedad	Cripps Pink	Red	Gala	Árboles totales
Caso inicial	Árboles	21.590	48.712	15.458	85.760
	Proporción	25 %	57 %	18 %	100 %
Caso 1	Árboles	21.050	47.494	15.072	97,5 %
Caso 2	Árboles	20.511	46.276	14.685	95 %
Caso 3	Árboles	19.431	43.841	13.912	90 %
Caso 4	Árboles	18.352	41.405	13.139	85 %
Caso 5	Árboles	17.272	38.970	12.366	80 %

Tabla 20: Resultados del análisis de sensibilidad sobre el total de árboles plantados.

Caso	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Pérdidas totales (%)	Variación	
				Pérdidas (%)	Margen (%)
0	515,4	67,82	34	0	0
1	477,7	68,13	32	-7	0
2	439,9	68,43	31	-15	1
3	364,4	68,63	27	-29	1
4	308,6	66,93	24	-40	-1
5	277,1	64,46	23	-46	-5

Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 20. El mejor escenario corresponde al caso 3, donde se reducen las pérdidas en un 29 % (151,1 toneladas) y aumenta el margen en un 1 % (\$807,3 miles), debido a un mejor ajuste en la relación oferta-demanda. El presente caso es de particular interés debido a la información que se puede extraer de él. Poder tener resultados sobre la distribución de árboles permite una planificación del monte que se ajusta más a la demanda percibida por el productor, y como se puede ver en este análisis de sensibilidad, una plantación de árboles coherente con el nivel de demanda permite mejorar ambos resultados simultáneamente, reduciendo la generación de pérdidas y maximizando el margen. Esto se debe a que al reducirse la cantidad total de oferta, se disminuye el exceso, lo que a su vez reduce las pérdidas y aumenta el margen, dado que se incurre en menores costos de almacenamiento. Sin embargo, luego del caso 4, el margen disminuye debido a que se venden menores cantidades, ya que la oferta es menor que la demanda. Por esta razón, se desarrolló una formulación alternativa del modelo, detallada en la sección 10.

9.7. Análisis de sensibilidad sobre la relación calidad-precio

La sensibilidad de la relación entre el precio y la calidad está representada por el parámetro δ . Este parámetro fue estimado a partir del rango de variación de precios en el mercado mayorista, en relación con el precio máximo. Al ser un parámetro estimado, interesa conocer el comportamiento del modelo frente a variaciones del mismo, para determinar el grado en el que la estimación podría estar afectando las conclusiones obtenidas a partir de la implementación del modelo.

Se plantearon cuatro casos: dos en los que aumenta la sensibilidad, y otros dos en los que disminuye. Este efecto solo impacta los precios de venta del mercado mayorista, pues se considera que los requisitos de supermercados son tales que el precio siempre se mantiene. Los resultados se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21: Análisis de sensibilidad del efecto de la calidad en el precio.

Caso	Delta (%)	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Variación (%)		
				Delta	Margen	Pérdidas
0	12,53	515,4	67,82	0	0	0
1	10,02	515,4	68,54	-20	1	0
2	6,27	515,4	69,61	-50	3	0
3	15,04	515,4	67,11	20	-1	0
4	18,80	515,4	66,04	50	-3	0

La tasa de afectación de la calidad sobre el precio influye en el margen, pero no en las pérdidas. Aunque el margen varía, las pérdidas permanecen constantes, lo que sugiere que la estrategia de ventas no cambia. Esta situación puede explicarse por el hecho de que el impacto de la calidad en el precio no es lo suficientemente significativo como para generar alteraciones

en la estrategia global de ventas.

9.8. Análisis de sensibilidad sobre la proporción de demanda de los clientes

Los múltiples clientes tienen diferentes requisitos de calidad, demanda y precio de las manzanas. Es de interés conocer el efecto que puede tener la estrategia de clientes sobre los objetivos de interés. Para este análisis, en todos los casos se consideró la misma demanda total, solo que redistribuida entre los clientes. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22: Análisis de sensibilidad de la proporción de demanda de clientes.

Caso	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Variación (%)		Proporción (%)	
			Pérdidas	Margen	Mer. mayorista	Supermercado
0	515,4	67,82	0	0	60	40
1	515,4	65,29	0	-4	70	30
2	515,3	62,75	0	-7	80	20
3	515,5	70,31	0	4	50	50
4	515,5	72,78	0	7	40	60
5	515,6	75,20	0	11	30	70
6	515,7	77,32	0	14	20	80

De los resultados obtenidos, es posible concluir que el margen obtenido es mayor cuanto mayor es la proporción de demanda del supermercado. Esto es comprensible, considerando las diferencias de precio entre ambos tipos de clientes. Asimismo, al aumentar la proporción destinada al supermercado aumentan levemente las pérdidas, lo cual es razonable debido a las restricciones impuestas por este cliente.

9.9. Análisis de sensibilidad sobre los costos de almacenamiento

Se evaluaron aumentos en los costos de almacenamiento, para analizar cómo responde el modelo ante ellos y si esto produce cambios en la estrategia de almacenamiento adoptada. Los escenarios analizados y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23: Análisis de sensibilidad ante el aumento de costos de almacenamiento.

Caso	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Variación (%)		
			Costo almacenamiento	Margen	Pérdidas
0	515,4	67,82	0	0	0
1	515,4	65,97	25 (AC)	-3	0
2	518,3	64,52	50 (AC)	-5	1
3	515,4	66,65	25 (CC)	-2	0
4	515,4	65,56	50 (CC)	-3	0

En aumentos de hasta 25 % (caso 1 y 3), el modelo opta por mantener la estrategia de ventas. Esto lleva a disminuciones en el margen, pero mantiene el nivel de pérdidas. Por el contrario, en el escenario donde se aumenta un 50 % los costos de cámara de atmósfera controlada, aumentan las pérdidas en 1 % (caso 2). Esto significa que se opta por estrategias de venta diferentes al caso inicial, llevando a que el sistema opte por conservar las manzanas un tiempo menor en este tipo de cámara. Esto da lugar a que haya más fruta en cámara convencional y que se den más pérdidas debido a la diferencia en tasas de deterioro (las cuales son mayores en el almacenamiento convencional). Por su parte, al aumentar un 50 % el costo de cámara convencional, el sistema opta por mantener la fruta el menor tiempo posible en este tipo de almacenamiento, lo cual lleva a mayores cantidades almacenadas en cámara de atmósfera controlada y ventas más rápidas (menor conservación en cámara convencional para lograr mejores precios).

10. Formulación alternativa

En este capítulo se presenta una formulación alternativa del modelo matemático planteado inicialmente. Este nuevo enfoque surge como respuesta a las observaciones realizadas sobre el modelo original, particularmente en relación con la sobreoferta generada al asumir que un 3 % de la demanda debería satisfacerse con el 3 % del total de árboles plantados en el país.

Dado que esta suposición llevó a un desbalance significativo con respecto a la demanda percibida, se desarrolló un modelo alternativo que ajusta las cantidades de árboles de las variedades. Este modelo busca mejorar los resultados operativos mediante la reducción del desequilibrio entre oferta y demanda, minimizando las pérdidas asociadas y optimizando la gestión de los recursos.

En esta formulación, el grado de capacitación de la mano de obra se establece como un parámetro fijo, asumiendo el nivel máximo posible de capacitación. Esta decisión se fundamenta en los resultados obtenidos durante la implementación y los análisis de sensibilidad, los cuales indican una preferencia consistente del modelo por seleccionar el nivel más alto de capacitación. No obstante, se introduce como nueva variable de decisión la cantidad de árboles a plantar, permitiendo ajustar este factor estratégico. Los demás parámetros, variables y restricciones del modelo original se mantienen inalterados.

El objetivo de esta formulación alternativa es poder analizar comportamientos que en el modelo original pueden haberse visto sesgados por la relación oferta-demanda tomada. Esto abarca decisiones de venta, conservación y la sensibilidad del modelo frente a cambios en los parámetros.

Para esta formulación alternativa se generó una nueva frontera de Pareto utilizando el método ya presentado y se analizaron los principales resultados. Además, se ejecutó un análisis de sensibilidad de la afectación de la calidad sobre el precio y la distribución de calibres de las manzanas, dado que estos análisis previamente realizados pueden haberse visto afectados por la cantidad de árboles impuesta originalmente.

La ejecución de la formulación alternativa se realizó en el mismo equipo que la formulación original. Se registraron mayores tiempos de cómputo, por lo que se limitó el tiempo de ejecución a 3.600 segundos, obteniendo un gap de optimalidad de 0 %.

10.1. Construcción de la frontera de Pareto

La frontera de Pareto se construyó siguiendo la misma metodología que para la implementación original.

En la Tabla 24 se presentan los valores obtenidos para los distintos objetivos dependiendo de la función optimizada. En el punto 0 se presentan los valores obtenidos al optimizar el objetivo relegado, y en los siguientes puntos, los valores obtenidos a partir de la implementación de las respectivas restricciones presentadas en la Tabla 25.

Tabla 24: Valores obtenidos para la formulación alternativa al optimizar cada una de las funciones, e imponiendo restricciones sobre las funciones relegadas.

Punto	Objetivo: maximizar margen		Objetivo: minimizar pérdidas	
	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)
0	106,4	79,37	0	-6,60
1	85,1	79,29	8,8	10,59
2	63,9	79,07	18,6	27,79
3	42,6	63,16	29,4	44,98
4	21,3	32,38	41,8	62,17
5	0	-6,60	106,4	79,37

Tabla 25: Restricciones impuestas en la formulación alternativa sobre las respectivas funciones objetivo para la construcción de la frontera de Pareto.

GAP		
Pérdidas (toneladas)		106,4
Margen (\$, millones)		85,97
Incrementos		
Pérdidas (toneladas)		21,3
Margen (\$, millones)		17,19
Objetivo	Maximizar margen	Minimizar pérdidas
Restricción	Pérdidas (toneladas) $\leq$	Margen (\$, millones) $\geq$
1	85,1	10,59
2	63,9	27,79
3	42,6	44,98
4	21,3	62,17
5	0	79,37

A partir de estos datos se genera la gráfica conjunta para la optimización de cada una de las funciones objetivo sujetas a diferentes restricciones (Figura 21), y la frontera de Pareto obtenida como resultado (Figura 22).

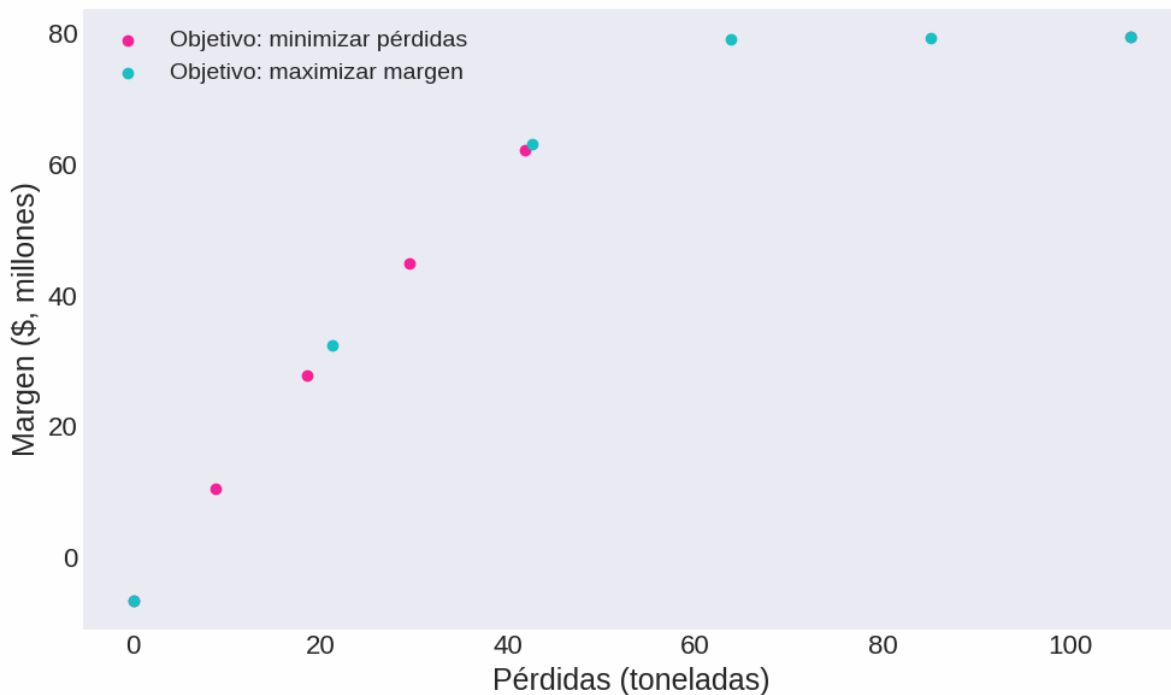


Figura 21: Puntos obtenidos en la formulación alternativa para construcción de la frontera de Pareto.

Los resultados obtenidos para esta formulación alternativa, donde los árboles son una variable de decisión, muestran que la frontera de Pareto queda conformada por puntos obtenidos al optimizar ambas funciones objetivo. Los gaps obtenidos son mayores respecto a la implementación original, abarcando un mayor rango para ambos objetivos. De esto se puede inferir que la decisión sobre la cantidad de árboles de las diferentes variedades tiene un mayor peso

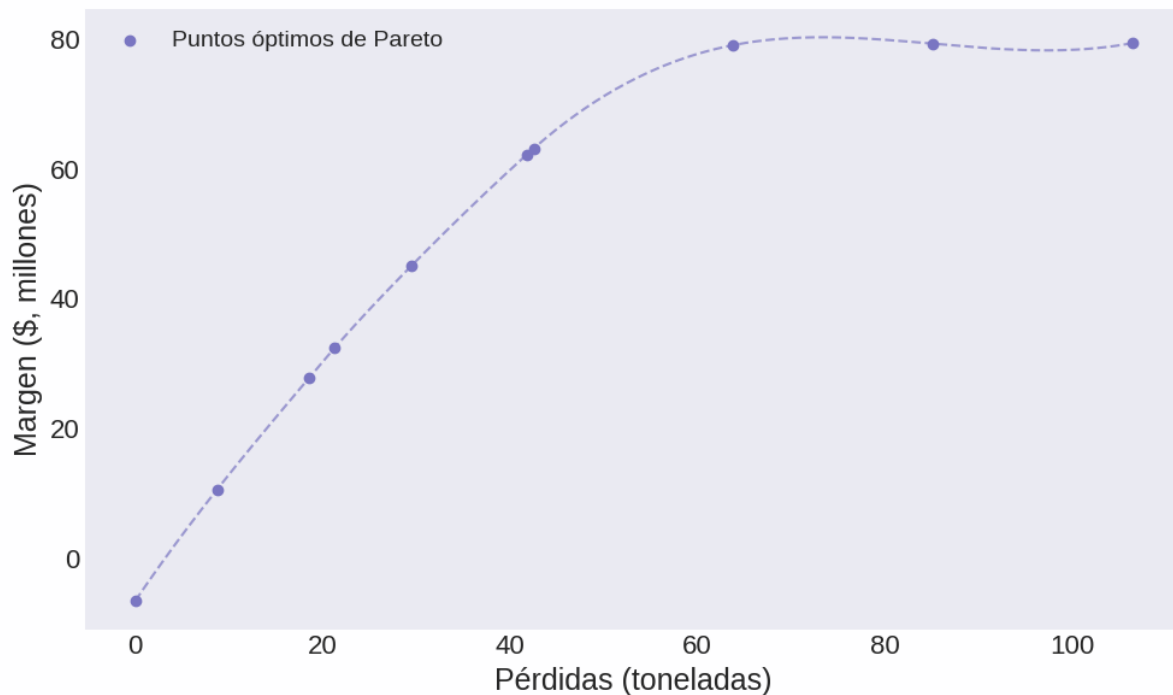


Figura 22: Frontera de Pareto generada en la formulación alternativa.

en el margen y pérdidas que puede llegar a percibir un productor y packing, siendo que esta es una decisión de índole estratégica y a largo plazo. Por otro lado, cuando la cantidad de árboles es fija y la mano de obra pasa a ser una decisión, los puntos de la frontera están acotados en un espacio menor, habiendo menores combinaciones “óptimas” posibles. Esto es concordante con que las decisiones son de índole operativo, con menor grado de repercusión en el resultado global.

10.2. Interpretación de resultados

En esta sub-sección se van a analizar los principales resultados obtenidos, a partir del análisis del punto de margen óptimo obtenido para la formulación alternativa.

En el punto óptimo se obtiene una ganancia de \$ 79,37 millones, con 106,4 toneladas de pérdidas. En este caso se obtienen mejores resultados de margen y de pérdidas que en comparación con la implementación original. Esto se hace a partir de la plantación de 9.092 árboles de Cripps Pink, 48.090 árboles de Red, y 7.883 árboles de Gala. En comparación con la cantidad de árboles de la formulación original, esto implica una reducción en la cantidad total de árboles, así como de las variedades Cripps Pink y Gala. En la Tabla 26 se presentan los números en detalle. La cantidad de árboles de Red es prácticamente igual, pero los árboles de Cripps Pink y Gala decrecen significativamente.

Las pérdidas generadas son 106,4 toneladas, de las cuales 58,9 toneladas se dan en la cosecha y 47,5 toneladas en el packing. En términos porcentuales, las pérdidas son un 9 % sobre la cantidad de fruta al momento de la cosecha, se pierde un 5 % en la cosecha, y las pérdidas en el packing son de 4 % sobre lo que ingresa. Estos valores están más alineados con lo presentado por [7], donde se estimó que las pérdidas mínimas en packing son del 3 % en relación a lo que ingresa a almacenamiento.

En cuanto al análisis de las pérdidas en packing, se muestran los resultados distinguiendo calibre y variedad en la Tabla 27. En este modelo, donde la relación entre oferta y demanda

Tabla 26: Comparación de cantidad de árboles por variedad en la formulación original y la alternativa.

Variedad	Formulación			
	Original		Alternativa	
	Árboles	Porcentaje de variedad (%)	Árboles	Porcentaje de variedad (%)
Cripps Pink	21.590	25	9.092	14
Red	48.712	57	48.090	74
Gala	15.458	18	7.883	12
Total	85.760		65.064	

está ajustada, las pérdidas son únicamente del calibre chico, para todas las variedades. No se da que el 100 % del calibre chico sea pérdida, como sí sucede en el modelo original, sino que son un 69 % sobre lo que se cosecha. Sin embargo, sigue siendo una proporción importante.

Tabla 27: Pérdidas en packing por calibre y variedad en la formulación alternativa.

Variedad	Calibre (toneladas)			Total (toneladas)
	Chico	Mediano	Grande	
Cripps Pink	8,5	0,0	0,0	8,5
Reds	33,2	0,0	0,0	33,2
Gala	5,8	0,0	0,0	5,8
Total (toneladas)	47,5	0,0	0,0	47,5
Pérdidas por calibre (%)	69	0,0	0,0	

Variedad	Pérdidas por variedad (%)	Pérdidas por variedad en packing (%)
Cripps Pink	5	18
Reds	3	70
Gala	6	12

En cuanto a las ventas, se logra vender un 100 % de los calibres medio y grande. Se vende calibre chico únicamente de la variedad Red, a diferencia de la implementación original donde la única variedad de la que se vende calibre chico es Gala. En la Tabla 28 se presentan las ventas por cliente, calibre y variedad.

10.3. Análisis de sensibilidad

Se hicieron los análisis de sensibilidad para aquellos casos donde los resultados se habían visto más afectados por la relación oferta-demanda desproporcionada, estos son los análisis sobre la distribución de calibres por variedad y sobre la afectación de la calidad sobre el precio. Para realizar este análisis, se tomó como base la cantidad de árboles obtenidos para el caso óptimo del modelo alternativo. Se utilizó este dato como cantidad de árboles para el modelo original, en el que los árboles son fijos y la mano de obra una decisión. Los análisis de sensibilidad se van a recrear sobre el modelo original, para la cantidad de árboles óptima calculada con la implementación alternativa.

Es importante tener en cuenta que los resultados óptimos a los que se llega con las dos formulaciones del modelo son diferentes, por más que usan la misma cantidad de árboles y grado de mano de obra. Esto se debe a que son formulaciones diferentes, y ambos son problemas no convexos (presentan variables binarias y enteras), por lo que los óptimos a los que llegan pueden ser locales y no necesariamente globales [37].

Tabla 28: Ventas por calibre y variedad obtenidas en la formulación alternativa.

Cliente: Supermercado					
Variedad	Calibre (toneladas)			Total (toneladas)	Venta al cliente (%)
	Chico	Mediano	Grande		
Cripps Pink	0,0	59,4	0,0	59,4	14
Reds	0,0	334,3	0,0	334,3	78
Gala	0,0	34,9	0,0	34,9	8
Total (toneladas)	0,0	428,5	0,0	428,5	
Cliente: Mercado mayorista					
Variedad	Calibre (toneladas)			Total (toneladas)	Venta al cliente (%)
	Chico	Mediano	Grande		
Cripps Pink	0,0	72,0	17,1	89,1	14
Reds	21,1	371,7	108,6	501,4	78
Gala	0,0	40,7	11,6	52,3	8
Total (toneladas)	21,1	484,4	137,3	642,8	

10.3.1. Análisis de sensibilidad sobre la distribución de calibres en los bins

Se consideraron los mismos casos que para la implementación original, disminuyendo la proporción del calibre medio y aumentando la proporción de los calibres chico y grande. Los resultados se presentan en la Tabla 29. Los casos y proporciones se mantienen en relación con lo presentado en la Tabla 12.

Tabla 29: Análisis de sensibilidad de la distribución de calibres para la cantidad de árboles alternativa.

Caso	Max. margen		Variación	
	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Margen (%)	Pérdidas (%)
0	199,0	68,74	0	0
1	199,0	68,49	0	0
2	199,0	68,85	0	0
3	200,7	69,14	1	1

Los resultados se sostienen en cuanto al margen, donde este disminuye al disminuir la proporción de calibre medio para las Red, y aumenta en el caso de las Cripps Pink y las Gala. Sin embargo, el comportamiento de las pérdidas cambió. Estas se conservan al cambiar la distribución de calibre de Red y Gala, pero aumentan levemente al cambiar la distribución para las Cripps Pink.

De los resultados se concluye que la distribución de calibres es un parámetro que afecta los resultados, pero en un menor grado. Igualmente, un raleo adecuado que favorezca la formación de manzanas de calibres medio y grande favorece el margen obtenido, sin perjudicar las pérdidas. Incluso, una adecuada técnica de raleo potencialmente puede reducir las pérdidas, dado que disminuye la formación de manzanas de calibre chico, que resultan ser las más difíciles de vender.

10.3.2. Análisis de sensibilidad sobre la relación calidad-precio

Se recreó también el caso de análisis de sensibilidad sobre el parámetro que representa el efecto que tienen los diferentes grados de calidad de las manzanas sobre el precio al cual se pueden vender. Se tomaron los mismos casos que los ya implementados. Los resultados se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30: Análisis de sensibilidad del efecto de la calidad en el precio para la cantidad de árboles obtenida en la formulación alternativa.

Caso	Max. margen		Variación		
	Pérdidas (toneladas)	Margen (\$, millones)	Delta (%)	Margen (%)	Pérdidas (%)
0	199,0	68,74	00	0	0
1	199,0	69,43	-20	1	0
2	199,0	70,47	-50	3	0
3	199,0	68,05	20	-1	0
4	199,0	67,01	50	-3	0

Los resultados obtenidos son similares a los presentados en la formulación con la cantidad de árboles original, resumidos en la Tabla 21. Se concluye que este parámetro no tiene un efecto considerable sobre la generación de pérdidas del sistema, dado que la estrategia de conservación y ventas no se ve afectada, pero sí afecta el margen debido a la naturaleza del parámetro.

11. Conclusiones

El presente proyecto desarrolló un modelo matemático con un enfoque multiobjetivo de una cadena de suministro de manzanas, con el fin de comprender su funcionamiento y analizar el impacto de diversos factores como la demanda, la calidad y la capacitación del personal en la optimización de las pérdidas y el margen del sistema. Además, se establecieron las bases para la toma de decisiones relacionadas con el almacenamiento, la venta y la capacitación de la mano de obra.

El modelo desarrollado en este estudio es de índole operativo, permite analizar estrategias de almacenamiento y ventas a partir de las dimensiones del problema, buscando lograr el mejor margen posible con las menores pérdidas de manzana asociadas. Para este abordaje se construyó la frontera de Pareto del sistema, ponderando estos dos objetivos.

Se desarrolló una formulación alternativa de índole estratégica que permite planificar las dimensiones de la producción en función de la demanda percibida. Este enfoque busca optimizar los recursos productivos, favoreciendo una planificación eficiente. La ejecución de esta implementación reportó mayores gaps, tanto para el margen como para las pérdidas, en comparación con los gaps obtenidos para la implementación original. Esto sugiere que la decisión sobre la cantidad de árboles a plantar influye considerablemente en las ganancias y pérdidas que un productor o packing podría enfrentar, siendo una elección estratégica y de largo plazo. En cambio, cuando la cantidad de árboles se considera fija y la decisión recae sobre la mano de obra, los puntos en la frontera de Pareto se encuentran en un rango más estrecho, lo que reduce las combinaciones “óptimas”.

Los resultados obtenidos en la implementación principal indican que el modelo es más sensible al margen, ya que las decisiones tienen un impacto mayor sobre este en comparación con las pérdidas. Es importante destacar que los objetivos de maximizar el margen y minimizar las pérdidas están más interrelacionados de lo que inicialmente se había considerado. En un principio, se asumió que la maximización del margen y la minimización de las pérdidas eran objetivos contrapuestos; sin embargo, los resultados demostraron que existe una relación entre ambos. La pérdida de una manzana implica la imposibilidad de su venta y, por tanto, una oportunidad de ingreso perdida. De igual manera, evitar la pérdida solo es posible garantizando su venta.

En todas las soluciones óptimas obtenidas con el objetivo de maximizar el margen, las pérdidas no aumentan de manera significativa debido a la relación antes mencionada. Sin embargo, lo contrario no siempre es cierto: cuando el objetivo principal es minimizar las pérdidas, el margen puede fluctuar en un rango mayor de valores. Esto se debe a que, en muchos casos, se puede optar por vender la fruta a precios muy bajos con el único propósito de evitar el desperdicio, lo que conlleva resultados económicos desfavorables y amplía la variabilidad del margen.

Por otro lado, en el análisis de calibres se destaca que suele incurrirse en mayores pérdidas de calibres pequeños. Desde una perspectiva económica, el manejo de los calibres pequeños debe recibir atención prioritaria para evitar una disminución en la rentabilidad general del proceso. Se recomienda a los productores poner énfasis en técnicas que favorezcan una mayor proporción de calibres medianos y grandes, como por ejemplo el raleo. Sin embargo, es fundamental considerar que el raleo implica una decisión estratégica, ya que al eliminar frutos se reduce la posibilidad de que estos crezcan, lo que genera pérdidas indirectas y potenciales. De acuerdo con expertos en el tema, esta práctica debe planificarse cuidadosamente para optimizar el rendimiento económico y minimizar riesgos asociados a la producción. Como estrategia complementaria, se sugiere la asociación con sidrerías, productoras de jugos u otras industrias que permitan aprovechar las manzanas de calibres pequeños, generando valor agregado, reduciendo pérdidas y optimizando el uso de las cámaras de almacenamiento.

Las pérdidas y el margen también están influenciados por la proporción asignada a los diferentes clientes, quienes demandan estándares de calidad específicos y ofrecen precios variables. Priorizar clientes que pagan precios más altos genera mejores resultados económicos, aunque

implica mayores pérdidas debido a las estrictas restricciones de calidad que estos imponen.

Estas restricciones suelen responder a preferencias estéticas del mercado más que a la calidad real del producto. Por ejemplo, las manzanas pequeñas, aunque aptas para el consumo, son rechazadas por los clientes o vendidas a precios menores, lo que genera un desperdicio significativo. Dado que cambiar esta cultura de consumo no es una solución factible en el corto plazo, se recomienda buscar alternativas como las antes mencionadas, para reutilizar estas frutas rechazadas y diversificar los ingresos.

Un aspecto relevante a destacar es la consistencia del modelo en la toma de decisiones respecto al grado de capacitación de la mano de obra seleccionada. Tanto en la implementación como en los análisis de sensibilidad realizados, se observa que el modelo tiende a preferir la mano de obra con el mayor grado de capacitación disponible. Esto evidencia el impacto significativo que tiene la capacitación de los trabajadores que manipulan las manzanas a lo largo de todo el proceso productivo.

Los beneficios derivados de contar con una mano de obra adecuadamente capacitada superan ampliamente el sobre-costo asociado a esta elección en comparación con opciones menos capacitadas. En este sentido, optar por trabajadores más calificados o mejorar su formación resulta económicamente preferible, ya que su impacto en la reducción de pérdidas compensa el costo adicional.

La relación directa entre la calidad de la fruta resultante y el nivel de capacitación de la mano de obra es un factor determinante. Una fruta de mayor calidad permite acceder a precios de venta más altos, lo que genera un mayor margen. Por lo tanto, priorizar la capacitación de los trabajadores no solo contribuye a minimizar las pérdidas, sino que también maximiza los beneficios económicos del proceso productivo.

Como observación general, es fundamental definir con precisión los parámetros del modelo, especialmente aquellos basados en estimaciones, debido a su impacto crítico en los resultados. Esto se evidenció en los análisis de sensibilidad, que llevaron a una reformulación del modelo para determinar la cantidad de árboles en función de los parámetros del problema, permitiendo tomar decisiones estratégicas más informadas. Este enfoque reveló que muchas de las pérdidas se debían al sobredimensionamiento de la cantidad de árboles plantados en relación con la demanda real.

Entre los parámetros más relevantes está el almacenamiento en cámaras de conservación, particularmente en aquellas de atmósfera controlada. Este factor es determinante en la generación de pérdidas, subrayando la necesidad de que los productores conozcan y gestionen adecuadamente las condiciones de sus sistemas de almacenamiento. Parámetros como α y β , que representan las tasas de deterioro dentro de las cámaras de almacenamiento, deben ser estimados con precisión. Errores derivados de un conocimiento limitado sobre el comportamiento del producto perecedero pueden distorsionar las decisiones operativas asociadas. Se recomienda implementar prácticas de monitoreo y control continuas para garantizar que los datos provistos estén alineados con las condiciones reales, logrando optimizar la eficiencia del sistema y reduciendo riesgos asociados al deterioro de la fruta, así como desarrollando estrategias de almacenamiento coherentes con la realidad.

Este proyecto no solo ha alcanzado los objetivos establecidos, sino que ha proporcionado una comprensión más profunda de los factores que determinan el éxito y la rentabilidad de la cadena de suministro de manzanas, sentando las bases para futuras investigaciones y mejoras en el proceso, con un enfoque en la minimización de las pérdidas de alimentos.

12. Perspectivas y continuidad del estudio

A pesar de que el modelo desarrollado ha permitido obtener conclusiones valiosas, existen diversos aspectos que podrían ser mejorados o ampliados en futuras investigaciones, lo que constituye una oportunidad para profundizar en la comprensión y optimización de la cadena de suministro de manzanas. Una de las principales áreas de mejora es la incorporación de pérdidas asociadas a factores climáticos, las cuales en este modelo fueron consideradas fijas. Sin embargo, dado que las condiciones climáticas varían considerablemente a lo largo del tiempo y en diferentes regiones, su impacto sobre la producción y las pérdidas de manzanas debería ser tratado de manera dinámica en investigaciones futuras. Esto permitiría desarrollar modelos más realistas que consideren la incertidumbre climática y sus efectos directos en la disponibilidad de la fruta.

Otro aspecto relevante es la consideración de la mano de obra. En el modelo actual, se asumió que la cantidad de trabajadores y su nivel de capacitación eran constantes. No obstante, en la práctica, la productividad de los trabajadores puede fluctuar en función de diversos factores, como la experiencia, el tamaño de la cuadrilla y las condiciones laborales. La inclusión de estas variabilidades podría permitir un modelado más preciso del rendimiento de la cosecha y de los costos asociados, ofreciendo así una visión más detallada de la eficiencia en la producción.

Además, el modelo no aborda los costos de plantación y cultivo de manzanas, considerándolos fijos. Sin embargo, estos costos pueden estar sujetos a variaciones importantes dependiendo de factores como la ubicación geográfica, las técnicas agrícolas utilizadas y la escala del problema (el tamaño del monte). Incluir estos costos de manera dinámica podría mejorar la precisión de las decisiones relacionadas con la asignación de recursos y la rentabilidad de las distintas variedades de manzanas.

Si bien se desarrolló una formulación alternativa que permite decidir sobre la distribución de los árboles a plantar, se trata de un modelo independiente. Con la intención de no perder la linealidad en la formulación del modelo, no se construyó un único modelo que permita decidir sobre el grado de capacitación de la mano de obra y sobre la distribución de los árboles a plantar de forma simultánea. Sin embargo, incorporar ambas decisiones permitiría optimizar la producción según la demanda y las características del mercado, lo cual es un aspecto crucial para mejorar la eficiencia y rentabilidad de la cadena de suministro.

Por otro lado, el modelo asume que los lotes de manzanas son homogéneos en términos de calidad, lo que no refleja la variabilidad real de los productos agrícolas. Las manzanas dentro de un mismo bin pueden diferir en características como el tamaño, color, presencia de defectos fisiológicos o enfermedades. Considerar esta heterogeneidad de calidad en el modelo permitiría un análisis más detallado de la influencia de estos factores sobre las decisiones de venta y almacenamiento.

El modelo también simplifica el proceso de almacenamiento al asumir que todos los bins en cámara de atmósfera controlada tienen la misma distribución de calibres, y que no existen múltiples cámaras de almacenamiento. Sin embargo, en la práctica, podrían existir variaciones entre las cámaras y diferencias en la distribución de calibres en función de los lotes almacenados. Incorporar estas variaciones ofrecería un enfoque más preciso sobre la gestión de inventarios y las decisiones de almacenamiento.

Asimismo, se asume que no hay devoluciones de los clientes, una suposición que podría no ser realista en todos los casos. La inclusión de devoluciones en el modelo podría proporcionar una representación más completa de las dinámicas del mercado y los efectos sobre la cadena de suministro, especialmente en términos de inventarios y flujos de productos recirculantes.

Además, el proceso de raleo de los manzanos, que afecta la distribución de calibres, ha sido asumido como óptimo en el modelo actual. Sin embargo, un enfoque más realista que tenga en cuenta las condiciones a las que están expuestos los manzanos durante el proceso de raleo podría mejorar el modelo y reflejar mejor las condiciones de la producción.

Los anteriormente mencionados aspectos constituyen áreas de mejora y expansión para el modelo, lo que abre oportunidades para futuras investigaciones que profundicen en la optimización de la gestión de la cadena de suministro de manzanas, permitiendo modelos más completos, ajustados a las realidades del mercado y la producción agrícola.

13. Bibliografía

- [1] María Noel Ackermann and A. Díaz. Frutales de hoja caduca: situación y perspectivas. *Anuario de OPYPA*, 2022.
- [2] Agroclub. Diseño y construcción exitoso de un packing frutícola, 2024.
- [3] Hamid Allaoui, Alok Choudhary, Yuhan Guo, and Jacqueline Bloemhof. Sustainable agro-food supply chain design using two-stage hybrid multiobjective decision-making approach, 2018.
- [4] Rana Azab, Rana S. Mahmoud, Rahma Elbehery, and Mohamed Gheith. A bi-objective mixed-integer linear programming model for a sustainable agro-food supply chain with product perishability and environmental considerations. *Logistics 2023*, 2023.
- [5] Altannar Chinchuluun and Panos M. Pardalos. A survey of recent developments in multi-objective optimization, 2007.
- [6] Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). Supply chain management terms and glossary. *CSCMP*, 2013.
- [7] María J. Crosa and Patricia Burzaco. Análisis de las pérdidas y sus causas en cadenas de suministro de manzanas. *Anuario de OPYPA 2021*, 2021.
- [8] María J. Crosa, Patricia Burzaco, and Giovanna Masaro. Seguimiento de pérdidas y desperdicio de manzana en un packing. *Facultad de Ingeniería de la UdelAR*, 2023.
- [9] Patricia de León. Entrevista sobre packing y producción, 2024.
- [10] DGSA. Norma para la producción integrada manzano. *Resolución N° 156/18 (2018)*, 2020.
- [11] M. Lütke Entrup, H.-O. Günther, P. Van Beek, M. Grunow, and T. Seiler. Mixed-integer linear programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yoghurt production. *International Journal of Production Research*, 2005.
- [12] FAO. Norma para las manzanas, 2010.
- [13] FAO. Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo: alcance, causas y prevención, 2012.
- [14] FAO. Food waste footprint: Impacts on natural resources, 2013.
- [15] FAO. The state of food and agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction, 2019.
- [16] Alicia Feippe. Momento óptimo de cosecha en manzana. *Unidad de Difusión e Información Tecnológica del INIA*, 1993.
- [17] Alicia Feippe. Desórdenes fisiológicos y problemas más comunes observados durante el almacenamiento de manzanas, peras y ciruelas en Uruguay. *Unidad de Difusión e Información Tecnológica del INIA*, 1995.
- [18] Vicente Giudice. Entrevista sobre packing y producción en la UAM, 2024.
- [19] Matías J. De Iacovo and Ramiro Tachini. Determinación de factores que limitan la productividad en cultivos de manzana de alto potencial. *Facultad de Agronomía de la Universidad de la República*, 2018.
- [20] L.I. Igbinosun and V. Ezugwu. Mathematical modeling of some perishable items in inventory. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 2022.

- [21] INIA. Seminario de actualización técnica en frutales de pepita, 2014.
- [22] Younis Jabarzadeh, Hossein Reyhani Yamchi, Vikas Kumar, and Nader Ghaffarinasab. A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network. *Management of Environmental Quality*, 2020.
- [23] Emiliano Lamarca and Rodrigo Maidana. Análisis de los canales de comercialización de frutas y hortalizas en el Uruguay, 2009.
- [24] Patricia Lema, María J. Acosta, Ruben Barboza, Sofía Barrios, Gabriel Camaño, and María J. Crosa. Estimación de pérdidas y desperdicio de alimentos en el Uruguay: alcance y causas, 2017.
- [25] CAMM MGAG, DIGEGRA. Anuario estadístico. *Observatorio Granjero*, 2016.
- [26] MGAP. Encuesta frutícola de hoja caduca. *Estadísticas Agropecuarias*, 2016.
- [27] MGAP. Anuario estadístico agropecuario 2023. *Estadísticas Agropecuarias*, 2023.
- [28] MIDES, INIA, UAM, and Udelar. Manual de tipificación de calidad de frutas y verduras procedentes de la agricultura familiar en Uruguay, 2023.
- [29] Ministerio de Ambiente. Estrategia nacional de prevención y reducción de las pérdidas y desperdicios de alimentos. *Ministerio de Ambiente de Uruguay*, 2023.
- [30] Gustavo Moizo. Entrevista sobre producción y packing, 2024.
- [31] Po ngarm Somkun. Stochastic mathematical model for food waste reduction in a two-level supply chain for highly perishable products. *International Journal of Supply Chain Management*, 2017.
- [32] Po ngarm Somkun. Mathematical modeling approach applied to food waste reduction at retailer and consumer levels in food supply chain, 2020.
- [33] Javier Arturo Orjuela-Castro, Juan Pablo Orejuela-Cabrera, and Wilson Adarme-Jaimes. Multi-objective model for perishable food logistics networks design considering availability and access. *Springer*, 2022.
- [34] Juliana Bruzzone Pablo Pacheco. Entrevista sobre UAM mayorista, 2024.
- [35] United Nations Environment Programme. Food waste index report 2021, 2021.
- [36] Vivian Severino. Entrevista como ingeniera agrónoma, 2024.
- [37] Alexander S. Strekalovsky. Global optimality conditions for nonconvex optimization. *Journal of Global Optimization*, 1998.
- [38] UAM. Precios de manzanas desagregados por variedad, calibres y calidad 2019-2024, 2024.
- [39] UAM. Volumen de ingresos de frutas y hortalizas frescas 052024. *UAM*, 2024.
- [40] Mauricio Varas, Franco Basso, Sergio Maturana, David Osorio, and Raúl Pezoa. A multi-objective approach for supporting wine grape harvest operations. *Computers and Industrial Engineering*, 2020.
- [41] Federico Veiga. Entrevista como coordinador de abastecimiento en Tienda Inglesa, 2024.
- [42] Julio Yaquinta. Entrevista sobre producción de manzanas, 2024.
- [43] M. Yuvaraj and R. Jothi Basu. A mathematical model to minimize the total cost in apple fruit supply chain: The case of Indian scenario, 2023.

14. Anexo

14.1. Anexo electrónico (Redactado)

El link al anexo electrónico en Google Drive incluido en la versión original de este informe fue retirado por razones de confidencialidad.

14.2. Entrevistas

14.2.1. Vicente Giudice - Packing y productor (Redactado)

La entrevista incluida en la versión original de este informe fue retirada por razones de confidencialidad.

14.2.2. Pablo Pacheco y Juliana Bruzzzone - UAM (Mayorista) (Redactado)

La entrevista incluida en la versión original de este informe fue retirada por razones de confidencialidad.

14.2.3. Federico Veiga - Coordinador Supply Chain Tienda Inglesa (Redactado)

La entrevista incluida en la versión original de este informe fue retirada por razones de confidencialidad.

14.2.4. Patricia de León - Packing y productora (Redactado)

La entrevista incluida en la versión original de este informe fue retirada por razones de confidencialidad.

14.2.5. Gustavo Moizo - Productor y Packing (Redactado)

La entrevista incluida en la versión original de este informe fue retirada por razones de confidencialidad.

14.2.6. Julio Yaquinta - Productor (Redactado)

La entrevista incluida en la versión original de este informe fue retirada por razones de confidencialidad.

14.2.7. Vivian Severino - Ingeniera Agrónoma (Redactado)

La entrevista incluida en la versión original de este informe fue retirada por razones de confidencialidad.

