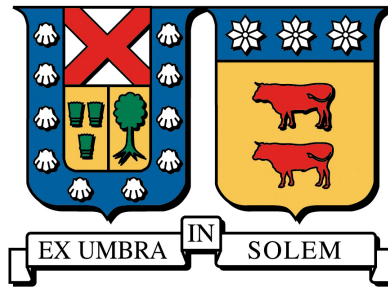


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO - CHILE



**PROGRAMACIÓN DETALLADA DE COSECHA DE
PRODUCTOS FRESCOS A PARTIR DE UN MODELO DE
CULTIVOS ZONIFICADOS EN CADENAS DE SUMINISTRO
AGRÍCOLA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

JAVIERA PAZ CAMERON RETAMAL

PROFESOR GUÍA

VÍCTOR MANUEL ALBORNOZ SANHUEZA

PROFESOR CORREFERENTE

WLADIMIR SOTO SILVA

JULIO 2022

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi mamá que con su amor y comprensión cambia el mundo de a poco para que sea cada vez un lugar mejor. En especial, quiero agradecer a mi papá que desde donde esté estaría orgulloso de todo lo que he logrado.

A mis mascotas Dora, Kirara, Dan y Lilith que me acompañaron en las noches de estudio y me dan cada día un amor inmenso.

A los especialistas en salud mental por ayudarme a sanar y a buscar mi felicidad en esta vida.

A mis amigos los que me han acompañado en este camino, que me impulsaron a seguir y apoyaron cuando se veía este momento tan lejano.

Por último agradezco a Tan Biónica y a Miranda que me acompañaron en todas los días de llanto, desesperación y estudio.

A mi profesor guía que me enseñó que la investigación es una forma de vida en la que no perdemos el asombro ante la cotidianidad y por creer en mis capacidades hasta más que yo misma.

"Todos los días del mundo existe una forma de resucitar..."

Tan Biónica. "Música".

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente trabajo se plantea un modelo de programación entera-mixta de maximización de utilidades que incluye los problemas de zonificación para el manejo de los cultivos y la programación de cosecha de una cadena agroalimentaria de productos frescos, en la cual se emplea una etapa de procesamiento de extensión de vida útil que permite la satisfacción de las demandas de clientes tanto nacionales como internacionales según sus requerimientos.

Se propone la resolución de este problema a través de dos enfoques el primero de manera jerárquica y el segundo de forma integrada. El enfoque jerárquico presenta un modelo de delineación de zonas de manejo para un cultivo, que presentan un nivel de homogeneidad requerido de alguna propiedad; y un modelo operativo de distribución de recursos que incluye la perecibilidad del producto, los trabajadores a emplear, rendimientos de cosecha, ventanas de nivel óptimo de madurez, disponibilidad de recurso de procesamiento e inventario y el transporte de los productos cosechados. El enfoque integrado es la resolución simultánea de los modelos mencionados anteriormente.

Estos enfoques son contrastados y analizados dada la resolución del modelo en un caso de estudio de uva de mesa de la variedad Red Globe de un productor de la región de O'higgins.

ABSTRACT

This paper presents an integer-mixed programming model of profit maximization that includes the zoning problems for crop management and harvest scheduling of an agri-food chain of fresh produce, in which a shelf-life extension processing stage is used to satisfy the demands of both national and international customers according to their requirements.

The resolution of this problem is proposed through two approaches, the first in a hierarchical manner and the second in an integrated manner. The hierarchical approach presents a model of delineation of management zones for a crop, which present a required level of homogeneity of some property; and an operational model of resource allocation that includes product perishability, workers to be employed, harvest yields, optimum maturity level windows, availability of processing resource and inventory and transportation of harvested products. The integrated approach is the simultaneous resolution of the aforementioned models.

These approaches are contrasted and analyzed given the resolution of the model in a case study of Red Globe table grapes from a grower in the O'higgins region.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción	8
1.1. Problema de Investigación	8
1.2. Objetivo General	10
1.3. Objetivos Específicos	11
1.4. Alcance	11
1.5. Organización	12
2. Marco Teórico	14
2.1. Agricultura de Precisión	14
2.2. Mercado Frutícola en Chile	15
2.3. Cadena Logística de Exportación de la Uva en Chile	17
2.4. Contratos de Exportación de Fruta en Chile	20
2.5. Cadenas Agroalimentarias	22
2.6. Actividades Cadenas Agroalimentarias	23
2.7. Relación Jerárquica en Cadenas Agroalimentarias	25
2.8. Modelos Matemáticos en las Cadenas Agroalimentarias	26
2.9. Modelo de Manejo de Cultivo por Zonificación	29
2.10. Modelos de Programación de Cosecha Integrados	30
2.11. Atributos Utilizados en Modelos de Cosecha	31
2.12. Calidad de Producción en Cadenas Agroalimentarias	33
2.13. Procesos de Extensión de Vida Útil	35
2.14. Enfoque Integrado en Modelos de Cosecha	36
3. Metodología	38

3.1. Enfoque Jerárquico	39
3.1.1. Modelo de Zonificación	39
3.1.2. Modelo de Cosecha	41
3.2. Enfoque Integrado	54
4. Caso Estudio	64
5. Resultados y Análisis	67
5.1. Análisis Modelo Jerárquico	68
5.2. Análisis Modelo Integrado	69
5.3. Análisis Comparativo	70
6. Conclusiones	76
A. Anexos	85
A.1. Linealización Varianza relativa	85
A.2. Parámetros del Modelo	85
A.3. Procesamiento	86
A.4. Comparación de Costos Modelos	87

Índice de tablas

2.1. Evolución de valor en exportaciones de fruta 1999-2019, conjunto a su tasa de crecimiento anual	17
4.1. Demandas totales de la región de O'Higgins de la producción de uva de mesa considerando destinos, volúmenes totales y vida útil requerida del producto.	66
5.1. Instancias utilizadas de varianzas del indicador NDVI y tamaños variables .	67
5.2. Resultados modelo de zonificación para cada instancia	68
5.3. Resultados modelo de cosecha para cada instancia	69
5.4. Resultados modelo integrado para cada instancia	70
5.5. Comparación de elección de zonas modelo jerárquico e integrado	70
5.6. Comparación resultado utilidades modelo jerárquico e integrado	71
5.7. Comparación demanda satisfecha e insatisfecha en los modelos jerárquico e integrado	72
5.8. Comparación porcentajes de aumento de costos del modelo integrado ante el modelo jerárquico para cada instancia	73
5.9. Número de restricciones, variables y tiempos de los enfoques jerárquico e integrado.	75
A.1. Parámetros utilizados en el caso de estudio para todas las instancias	85
A.2. Parámetros variables entre instancias según su horizonte de planificación . .	86
A.3. Costos de procesamiento de chitosan glucosa. Fuente: Gao , et al.(2013) y Universidad Técnica de Ambato , et al.(2015)	86
A.4. Comparación de costos en los modelos jerárquico e integrado	87

A.5. Comparación de costos en los modelos jerárquico e integrado	87
--	----

Índice de figuras

2.1. Cadena logística de exportación a través del Puerto de Valparaíso de la uva de mesa en Chile.	18
2.2. Relación jerárquica de actividades cadenas agroalimentarias	26
3.1. Cadena agroalimentaria modelada.	38

1. Introducción

1.1. Problema de Investigación

Los mercados agrícolas enfrentan grandes incertidumbres, potenciadas actualmente por la pandemia COVID-19, no obstante, las proyecciones a 10 años contemplan un crecimiento en la producción agrícola y pesquera de 1,5 % al año, principalmente relacionado con el crecimiento de la población de 1,6 % anual ([OECD/FAO, 2020](#)). El 85 % de crecimiento en la producción agrícola provienen de un extensivo uso de insumos, inversiones en tecnología y mejores prácticas de cultivo ([OECD/FAO, 2020](#)). Este crecimiento conlleva una intensificación de la superficie cosechada la cual se espera aumentará 19.6 millones de hectáreas a 2029 ([OECD/FAO, 2020](#)).

Uno de los principales mercados agrícolas es el de las frutas, productos frescos que poseen una alta perecibilidad y una cadena logística compleja ([Ahumada & Villalobos, 2009](#)). A nivel mundial, durante el año 2018 se produjeron 868 millones de toneladas de frutas ([Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020](#)), a pesar de esto, la disponibilidad de frutas y hortalizas ha sido histórica y sistemáticamente insuficiente para satisfacer el consumo recomendado ([Mason-D'Croz, et al. 2019](#)), el cual es de por lo menos 400 g de frutas y verduras al día. ([World Health Organization, s.f.](#))

En Chile la superficie sembrada es de 576.415 hectáreas en el periodo 2019/2020 con una cosecha de 7.103.001.100 kg de producto ([Instituto Nacional de Estadísticas, 2020](#)). El sector productivo frutícola en Chile es un reconocido actor dado que exporta más de 50 diferentes especies de frutales, en donde se registran 342.654 hectáreas cultivadas y 571.894 trabajadores en el sector ([Pefaur, 2020](#)).

El sistema agrícola contiene los procesos e interacciones de las partes interesadas en la producción desde el nivel planta al consumo ([Dora , et al. 2021](#)), generando cadenas agroalimentarias, en una de las cuales se presenta la cosecha. Cabe destacar que en esta etapa, la época de cosecha es un periodo relativamente corto y de intensa actividad ([Soto-Silva , et al. 2017](#)). Por lo que este aumento en la superficie trae consigo mayores esfuerzos por parte de los agricultores al tener que cosechar una mayor superficie en la misma ventana temporal.

En este contexto se han desarrollado modelos con el fin de optimizar los procesos involucrados en la cosecha de cultivos. Distintas revisiones de la literatura actual han analizado los modelos existentes tanto en su finalidad como su formulación y llegado a conclusiones con respecto a ellos. Por ejemplo, [Kusumastuti , et al.\(2016\)](#) enfatiza la necesidad de la integración de modelos de problema de cosecha y de procesamiento tomando en cuenta las limitaciones de ventanas de tiempo, rendimiento, precios, entre otras; [Alemany , et al.\(2019\)](#) recalca la necesidad de modelos más realistas para capturar de mejor manera las características de las cadenas de suministros en agricultura, específicamente en el área de cosecha en donde hace falta tomar en cuenta la temporalidad en conexión con la demanda del producto. Por último, [Nematollahi y Tajbakhsh\(2020\)](#) destacaron la importancia de integrar modelos para enfrentar problemas relacionado con la incertidumbre dada por la naturaleza y los desafíos de sustentabilidad en la agricultura que aumentan la complejidad del problema.

Dentro de la gestión de cultivos, las propiedades espaciales y temporales determinan la variabilidad de la vegetación que precisan aspectos claves en la calidad de los procesos de cosecha. La zonificación responde a esta variabilidad y hace posible la gestión de los cultivos y la planificación de cosecha para obtener la mejor calidad del cultivo ([Albornoz , et al. 2021](#)). Por lo que este sistema sienta las bases para implementar un sistema de eficiencia

integral en los cultivos.

En función de lo anterior, recaen las preguntas ¿Cuáles son las variables relevantes en un plan de cosecha de frutas, que garanticen la calidad y eficiencia del proceso? ¿De qué forma se pueden incorporar estas variables a un plan de cosecha con ventana de tiempo específica dado una plantación zonificada y perecible? ¿Cómo estas características afectan en un modelo de maximización de utilidades al momento de planificar y programar un plan de cosecha?.

Este trabajo de memoria nace del interés de estudiar, diseñar y plantear un modelo de programación de cosecha de frutas que incorpora nuevas variables de estudio en la cosecha de cultivos, con el fin de realizar un uso eficiente de los recursos, incorporando nuevas etapas de las cadenas agroalimentarias, optimizando la calidad de la producción y maximizando utilidades, con cultivos seleccionados a partir de modelos de zonificación de cosecha, que toman en cuenta la dinámica y la variabilidad de los productos.

1.2. Objetivo General

Formular un modelo de optimización para la programación determinista de cosecha de frutas detallada a partir de un modelo de zonificación, optimizando los recursos utilizados en esta actividad, integrando relaciones jerárquicas en la cadena de suministros, incorporando la perecibilidad de estos para asegurar la calidad y cantidad requerida de producción de frutas maximizando las utilidades a obtener.

1.3. Objetivos Específicos

- Estudiar y analizar los principales modelos de programación de cadenas agroalimentarias de cosecha y modelos integrados, a través de la revisión bibliográfica de modelos desarrollados para distintos y/o múltiples tipos de cultivos, incluyendo frutas.
- Determinar e identificar las variables relevantes en la planificación de cosecha para garantizar la calidad de los productos a abordar a pesar de su perecibilidad y la eficiencia del modelo dentro de la cadena agroalimentaria, a través de la investigación de modelos de cadenas agroalimentarias de productos frescos, restricciones y consideraciones relevantes.
- Desarrollar los tipos de modelos atingentes a las variables elegidas para capturar las características del proceso de un caso de cosecha de frutas con una cadena agroalimentaria tanto de manera jerárquica como integrada.
- Constatar la eficacia de los modelos planteados a través de la resolución, análisis y validación de estos en un caso de estudio en uvas de la zona centro sur del país.

1.4. Alcance

En este trabajo se desarrollan dos procedimientos según los objetivos anteriormente mencionados. El primero es un procedimiento de alcance descriptivo, en el cual se investiga, caracteriza y describe primeramente la agricultura y el mercado frutícola en Chile, especialmente focalizado en el mercado de la uva; conjunto a las cadenas agroalimentarias, modelos matemáticos y atributos relevantes a abordar en estas cadenas descritas.

El segundo procedimiento es exploratorio dado que los modelos expuestos en sus diferentes enfoques se desarrollan en una gran parte de la cadena agroalimentaria y con aspectos destacados a abordar por las distintas revisiones de literatura estudiadas; además, se presenta en un caso de estudio puntual de uva del tipo Red Globe de un productor de la Región de O’ Higgins.

El presente permite observar el desarrollo de la aplicación de los modelos matemáticos en las cadenas agroalimentarias y el mercado de la uva en Chile. Además, de la creación de un modelo con atributos atingentes con seguimiento a lo largo de la cadena agroalimentaria que permiten la ampliación de estos a nuevas áreas de interés de productos agrícolas; además de sentar las bases para trabajos futuros que impliquen nuevos enfoques matemáticos que permitan modelar situaciones aún más realistas.

1.5. Organización

Este trabajo de investigación se expone de la siguiente manera: En el capítulo titulado marco teórico se presentan antecedentes de la agricultura de precisión, el mercado frutícola chileno, la descripción de la cadena logística y contratos de las exportaciones de fruta. En este también se observan las principales características de las cadenas agroalimentarias, conjunto a sus actividades y relación jerárquica. La aplicación y aspectos destacados de los modelos matemáticos en estas cadenas, considerando modelos relevantes de zonificación y programación de cosecha.

Luego en el capítulo de metodología se realiza una descripción del problema a modelar y se desarrollan dos tipos de enfoques de optimización deterministas: un enfoque jerárqui-

co que inicia con la resolución de un modelo de zonificación, continua con un modelo de programación de cosecha y concluye con un modelo con enfoque integrado de estos.

Posteriormente, se observa el capítulo de resultados y análisis, en donde se encuentra una descripción del caso de estudio utilizado y las instancias resueltas, conjunto a un análisis comparativo de las principales variables consideradas.

Por último, se presentan las conclusiones del trabajo realizado y el posible desarrollo futuro de este tema de estudio.

2. Marco Teórico

2.1. Agricultura de Precisión

La agricultura es el conjunto de técnicas y conocimientos relativos al cultivo de la tierra ([Real Academia Española, s.f.-a](#), definición 2). El sistema agrícola incluye el proceso de producción y la interacción de los interesados desde la fábrica hasta el nivel de consumo ([Dora , et al. 2021](#)). En estos se distinguen según los productos obtenidos de cultivo y otros no provenientes de cultivo, como ganado ([Nematollahi & Tajbakhsh, 2020](#)).

La agricultura de precisión permite capturar la variabilidad espacial y temporal de los campos([Gentos , et al. 2013](#)), a través del uso de tecnología de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos, maximizando el rendimiento de la producción agrícola ([Ministerio de Agricultura Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2019](#)). Esta información recolectada puede ser utilizada para evaluar la densidad óptima de siembra, uso de fertilizantes, gestionar el recurso hídrico, predecir cantidad de cultivos y calidad del producto final ([Villalobos , et al. 2009](#)).

Las imágenes de satélite son utilizadas para evaluar y monitorear el estado de la vegetación, a través de la observación de la cobertura vegetal, se puede categorizar y discriminar características particulares de un área ([Muñoz, 2013](#)). De estas imágenes pueden obtenerse índices que son parámetros calculados a través de operaciones algebraicas que pueden corresponder a la vegetación en una zona.

Entre estos índices se encuentra el índice NDVI, correspondiente al índice de vegetación de diferencia normalizada, que mide la biomasa de los cultivos y que permite estimar el rendimiento y la calidad del cultivo ([Albornoz , et al. 2019](#)). [Gentos , et al.\(2013\)](#) destacan

la aplicación de este índice en frutas cosechadas, obteniendo que a un mayor NDVI se posee un mayor rendimiento de productos en el campo, pero por el contrario se cosechan frutas de menor calidad. [Daniel Leiva\(s.f.\)](#) declara que a mayor número de este índice se espera una mayor producción y una cosecha más tardía.

La fórmula de obtención de este índice se obtiene a través de la pendiente entre dos índices. El índice NIR, espectroscopia de infrarrojo cercano, que consiste en medir la absorción de luz asociada a la vibración de los enlaces moleculares, y RED, espectroscopía de reflectancia de la parte roja visible, luz roja visible captada en la cobertura ([Muñoz, 2013](#)).

2.2. Mercado Frutícola en Chile

Según el estudio realizado por [Pefaur\(2020\)](#), en los últimos 20 años, la superficie plantada con frutales en Chile ha aumentado a una tasa anual de 3,2 %, en donde se registran 342.654 hectáreas al año 2019. En 2018 existían 19.923 huertos frutales, de los cuales el 52,4 % son productores con huertos de 5 hectáreas o menos, 38,7 % huertos entre 5 y 50 hectáreas y un 8,9 % huertos con más de 50 hectáreas. La distribución de esta superficie el 25 % del total nacional se encuentra en la Región de O'Higgins, el 22 % en la Región del Maule y un 15 % en la Región Metropolitana. Estas regiones añadiendo la región de Valparaíso concentran 263.745 hectáreas, equivalente al 77 % de la superficie nacional de frutales, esto implica una disminución de huertos en el norte del país y un desplazamiento de frutales al centro sur de Chile.

Además destaca que la producción en Chile se divide en productos frescos, producción para procesamiento (congelados, conservas, deshidratados, jugos, aceites) y producción de

frutos secos (nueces, almendras, avellanas, y otros frutos de nuez) y del total producido a grandes rasgos, el 70 % corresponde al mercado de productos frescos, el 20 % de productos para procesamiento y por último un 10 % de frutos secos.

En el sector agrícola chileno resalta el rubro de la fruticultura dado que es un país referente en el comercio exterior en términos de exportaciones de fruta fresca a nivel mundial, la exportación se define como las ventas o envió de productos al exterior ([Banco Central de Chile, s.f.](#)), y en términos de cultivos anuales es la actividad que mayor número de hectáreas sembradas posee a nivel nacional ([Ministerio de Agricultura Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2019](#)). Chile ha mantenido su liderazgo como mayor exportador de fruta estas representan más del 60 % de la producción frutícola nacional en la mayoría de las especies, pues llega a consumidores más sofisticados y exigentes ([ODEPA, 2019a](#)). Desde 1978 a 2018 las exportaciones de frutas han aumentado un 3.573 % aumentando de USD 187 millones a USD 6.868 millones ([ODEPA, 2018](#)).

Las categorías de fruta exportada se dividen en fruta fresca, frutos secos, fruta congelada, fruta deshidratada, fruta en conserva, jugos de fruta y aceites de fruta. Dado que actualmente Chile cuenta con 29 acuerdos económicos la fruta exportada permite entrar con bajos o ningún arancel a cerca de 65 países o bloques comerciales, varios de los cuales cuentan con una relevante demanda de productos alimenticios, como Canadá, la Unión Europea, EE.UU y China, siendo estos últimos los principales compradores de fruta con un 26 % y 25 % respectivamente ([Pefaur, 2020](#)).

Tabla 2.1: Evolución de valor en exportaciones de fruta 1999-2019, conjunto a su tasa de crecimiento anual

Tipo de fruta de exportación	Millones de dólares FOB 1999	2019	Tasa de crecimiento anual
Fruta Fresca	1342	5305	7,1 %
Frutos Secos	51	595	13,0 %
Fruta Congelada	48	384	11,0 %
Fruta Deshidratada	95	353	6,8 %
Fruta en Conserva	92	290	5,9 %
Jugos de Fruta	66	189	5,4 %
Aceites de Fruta	0	61	37,0 %

Nota. Se presenta los valores de exportaciones de fruta en FOB, lo cual corresponde al valor de la mercancía puesta en el puerto de embarque, incluyendo aduana, transporte y empaquetado, entre otros. Fuente: [Pefaur\(2020\)](#)

En la Tabla 2.1 se observa que el mercado de fruta fresca es el que posee menor tasa de crecimiento anual, a pesar de esto posee el mayor nivel de ingresos al país dentro del rubro frutícola de exportación superando a su seguidor en un 892 %. Por lo que se posiciona como una gran fuente de recaudación para el país.

2.3. Cadena Logística de Exportación de la Uva en Chile

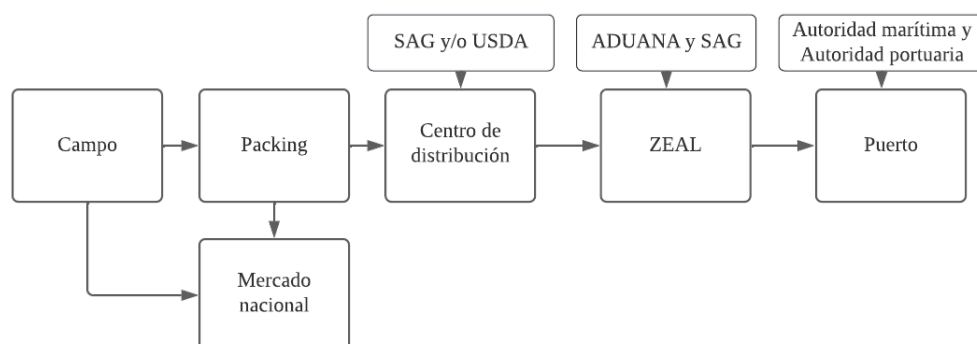
La cadena logística de exportación de la uva de mesa, involucra entes de fiscalización que supervisan el cumplimiento de los diferentes estándares internacionales, los cuales se presentan a continuación.

- Servicio Agrícola y Ganadero (SAG): Organismo encargado de apoyar el desarrollo de la agricultura, protege y mejora la salud de los animales y vegetales. También evitan plagas o enfermedades a través de controles fronterizos de tipo fito y zoosanitario. ([Servicio Agrícola y Ganadero, s.f.](#))

- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA): Organismo que fiscaliza el cumplimiento de las regulaciones sobre la manipulación de alimentos, la preparación y la fabricación, de acorde a los estándares estadounidenses. ([United States Department of Agriculture, s.f.](#))
- Servicio Nacional de Aduana (Aduana): Institución pública que agiliza las actividades de importación y exportación y resguarda los intereses del estado a través de la fiscalización y recaudación de impuestos. ([Servicio Nacional de Aduanas, s.f.](#))
- Autoridad Portuaria: Administrador del puerto. En el puerto de Valparaíso, el cual es utilizado en este caso, es la Empresa Portuaria de Valparaíso la cual administra, desarrolla y conserva el puerto, conjunto a las actividades realizadas en este. ([Puerto Valparaíso, s.f.](#))

En la Figura 2.1 se observa la cadena logística de exportación de la uva de mesa, la cual se describe más adelante .

Figura 2.1: Cadena logística de exportación a través del Puerto de Valparaíso de la uva de mesa en Chile.



Nota. Se incluyen en esta cadena logística los entes fiscalizadores respectivos en cada etapa.
Fuente:Elaboración Propia.

El envío de uva de mesa al exterior inicia con el productor, específicamente en el campo en donde se cultivan y cosechan estos productos frescos. Luego, son trasladadas a la sección de packing, en donde se realizan actividades tomando en consideración las propiedades físicas y químicas del producto. Tales como embalaje, envase, limpieza, selección y empaque de las uvas. Estas se separan entre las que cumplen los requisitos de exportación según su destino y las que no, las cuales se derivan para ser parte del mercado de consumo nacional.

Tras este proceso pasan a centros de distribución u acopios, los cuales pueden ser realizados por el productor o a empresas exportadoras externas, es aquí donde se realizara el embalaje final del producto en cajas, según los requerimientos del país del destino, para proceder a el orden de estas en pallets. Estos últimos pueden ser transportados en este formato final, también llamado formato de carga fraccionada, o ubicados en contenedores, llamada carga contenedorizada. Dentro de estos centros se realizan inspecciones que aseguran el envío con la calidad requerida en el destino, por parte del SAG o del departamento agrícola del destino con presencia en Chile, como USDA en el caso de Estados Unidos.

Luego de salir de los centros de acopio la carga se dirige al puerto, donde se ubican las infraestructuras para el desarrollo de las actividades portuarias. En el puerto pasa a la Zona de extensión de apoyo logístico (ZEAL), sistema portuario chileno de operación de flujos de carga y fiscalización en el puerto de Valparaíso, donde se realizan la fiscalización de las cargas por entidades la Aduana y el SAG, donde se procede a recibir el permiso para dirigirse a los terminales asignados según su tipo de carga.

Al llegar al terminal la autoridad portuaria coordina, planifica y fiscaliza las actividades de los distintos concesionarios del puerto. Por último, la autoridad marítima a cargo autoriza el arribo y zarpe del buque en el puerto. ([Arancibia Estay & Córdova Arellano, 2018](#))

2.4. Contratos de Exportación de Fruta en Chile

Las exportaciones se encuentran marcadas por tres incertidumbres principales: la volatilidad de los precios, dado que los productos perecederos varían su precio diariamente y obligan a negociaciones constantes; la calidad de los productos, dada la naturaleza de los productos ocurren pérdidas de valor en la mercadería durante los viajes; y el entorno de las transacciones, ineficiencias en los sistemas legales de los países involucrados como en servicios logísticos y aduaneros, entre otros. (Codron & Lizarraga, 2020)

Contardo(2013) destaca los tipos de contratos utilizados por exportadores chilenos e importadores.

- Consignación: El exportador envía la mercancía y el importador es el encargado de su venta en el destino al mejor precio posible.
- Consignación libre: Ningún precio es fijado antes del envío, por lo que el productor envía la producción contratada, la empresa transa este producto y al final de la temporada esta emite la liquidación al productor descontando costos y comisiones del proceso de exportación.
- Consignación con mínimo garantizado: Las partes acuerdan un precio basal con la expectativa de mejora a la venta en destino, este precio puede ser establecido por el kilo neto de fruta exportada, según su variedad, tiempo de embarque, temporada, calidades entre otras. Este precio se condiciona al cumplimiento de la calidad requerida al momento de la revisión en el puerto de destino.
- Consignación de precio ajustable valor F.O.B: Este es el valor obtenido determinado por los valores obtenidos al puerto de embarque, según variedad, fecha

de embarque, volumen exportado, entre otros. A estos se le aplican deducciones correspondientes de contratos complementarios para sacar la fruta con los requisitos que se solicitan internacionalmente, presentados a través de facturas al Banco Central.

- Compraventa con cláusulas comparativas: El precio inicial corresponde al promedio pagado por las otras empresas exportadoras, se determina un plazo para la comparación de la liquidación del comercializador con otras empresas. El precio final corresponderá al que le resulte más favorable al productor.
- Contratos de comisión: El productor encarga a una empresa la venta de sus productos al exterior, este se encarga del transporte y venta. La empresa exportadora recibe una comisión por las ventas.
- Venta Firme: Las partes fijan un precio previo al envío de la mercadería y obliga al productor a entregar una cantidad fija de frutas, con determinada calidad a una empresa, a la cual se le obliga a pagar una cantidad de dinero. El precio de los productos no se relaciona con el precio definitivo que se obtenga de la fruta en el exterior.

El tipo de contrato puede variar según la relación de confianza entre el productor, las empresas exportadoras y los países involucrados, si no existe una relación fuerte son más comunes los contratos de venta firme, en cambio, a mayores mecanismos de coordinación y países con mayor seguridad jurídica de los países se utilizan mayor cantidad de contratos por consignación. Cabe destacar que el consumidor demanda productos más frescos y más seguros, que establecen exigencias sanitarias más estrictas que las normas oficiales, con el fin

de cumplir con esta exigencia es de importancia la coordinación y contratos más completos que agreguen valor al producto.([Codron & Lizarraga, 2020](#))

2.5. Cadenas Agroalimentarias

Las cadenas agroalimentarias corresponden a los eventos vinculados a la producción de los alimentos ([Food and Agriculture Organization of the United Nations, s.f.](#)), tanto de manera directa o indirecta para satisfacer la demanda de los consumidores y al mismo tiempo satisfacer las expectativas y necesidades de los participantes interesados de la empresa ([Chopra & Meindl, 2016](#)). Dentro de estas cadenas agroalimentarias se pueden subdividir, en actividades tales como cultivar, cosechar, preprocesar, procesar, almacenar y transportar ([Kusumastuti, et al. 2016](#)).

Estas pueden diferenciarse por el tipo de producto que elaboran los cuales pueden dividirse en perecibles y no perecibles. Los productos perecibles también llamados productos frescos, corresponden a frutas y verduras, se deterioran rápidamente, su vida útil es limitada y su cadena es compleja logísticamente; en cambio, los productos no perecibles poseen una larga vida útil, por lo que pueden almacenarse por una mayor cantidad de tiempo ([Ahumada & Villalobos, 2009](#)). Los principales productos no perecibles son leguminosas, cereales, enlatados y productos secos; en cambio, la mayoría de productos perecibles son frutas y verduras ([Ministerio de Agricultura República Dominicana, 2020](#)).

2.6. Actividades Cadenas Agroalimentarias

Según lo mencionado en la 2.5 se presentan las principales características de las actividades dentro de las cadenas agroalimentarias.

- Cultivar: Planificación de producción que determina la mezcla de productos a cultivar, asignación de tierras para cada cultivo, plantación de semillas, aplicación de fertilizantes, control de plagas y enfermedades, que conlleva a la maduración de cultivos (Kusumastuti , et al. 2016).
- Cosechar: Inicia esta actividad cuando el cultivo llega a su maduración. Dentro de esta se determina el ritmo de cosecha, secuencia, ruta de programación de cosecha y asignación de recursos(Kusumastuti , et al. 2016). La programación de cosecha es complicada dada la ventana limitada de tiempo y las restricciones de recursos (Ferrer , et al. 2008). Dentro de estas limitaciones se encuentran las condiciones meteorológicas que afectan el proceso de maduración, las capacidades operativas tanto de trabajadores como de presupuesto, maquinarias, entre otras (Kusumastuti , et al. 2016; Soto-Silva , et al. 2017).Las operaciones de cosecha varían según el cultivo dentro de estas operaciones se identifican la cosecha manual y mecánica.
 - Cosecha manual: Se utiliza mayoritariamente en cultivos de productos perecibles o frescos, en donde trabajadores recolectan el producto a través de distintos métodos como la cosecha de tiras, en donde se cosechan hileras de producto; recolección total,en donde se cosecha todo lo disponible en un campo; o la recolección selectiva , en la cual se realizan cosechas de manera diferencial en distintos periodos en

donde se recorre todo el campo en busca de los productos adecuados para la cosecha ([González-Araya , et al. 2015](#)), que la vuelven una práctica de alto costo y uso de mano de obra ([Peng & Vougioukas, 2020](#)). Algunos productos cosechados de esta manera son tomates ([Miller , et al. 1997](#)), cerezas dulces ([Ampatzidis , et al. 2014](#)), uvas para vino ([Ferrer , et al. 2008](#)).

- Cosecha mecánica: Diseñada para la extracción masiva del producto, se utilizan sacudidores, chorros de aire o agentes de precosecha para aflojar los frutos maduros, los problemas de esta técnica es que posee menor flexibilidad de acceso entre campos, daño a la fruta y árboles, así como una menor selección de calidad ([Peilin Li, 2011](#)), este tipo de operación se utiliza en el caso de la caña de azúcar ([Sethanan & Neungmatcha, 2016](#)) .
- Preprocesar: Se considera el material cosechado como materia prima por lo que se somete a tratamientos tales como pelado, secado y redimensionamiento para prepararlos para el proceso posterior ([Apaiah & Hendrix, 2005](#)), en el caso de los productos con larga vida útil, como las semillas, pueden someterse a la trilla ,separación del grano de la paja,y el secado ([Gewinner , et al. 1996](#));para productos frescos, se utilizan procesos para incrementar la vida útil del producto ([Maia , et al. 1997](#)),tal como modificaciones en la atmósfera, técnicas de envasado, tratamientos de recubrimiento entre otros.
- Procesar: En esta actividad se modifican las propiedades intrínsecas de la mercancía, tal como la deshidratación, proceso de eliminación de agua que detiene el crecimiento de microorganismos que deterioran el producto ([Kurozawa , et al. 2012](#)), por otra parte se encuentra la molienda, en la cual se muele el producto ([Real Academia Española, s.f.-c,](#)

definición 1), creando partículas más pequeñas, la micronización, en donde se obtienen polvos superfinos de menor tamaño que la molienda ([Zhang , et al. 2012](#)), conservas, en donde se sumerge el producto en una solución para mantener sus propiedades y se envasa herméticamente ([Real Academia Española, s.f.-b](#), definición 1), congelados en los cuales se ocupa la congelación para disminuir la actividad del agua e inhibir el crecimiento de los microorganismos ([Fellows, 2000](#)). De esta forma se crean los productos finales con un mayor valor que satisface la demanda de los clientes.

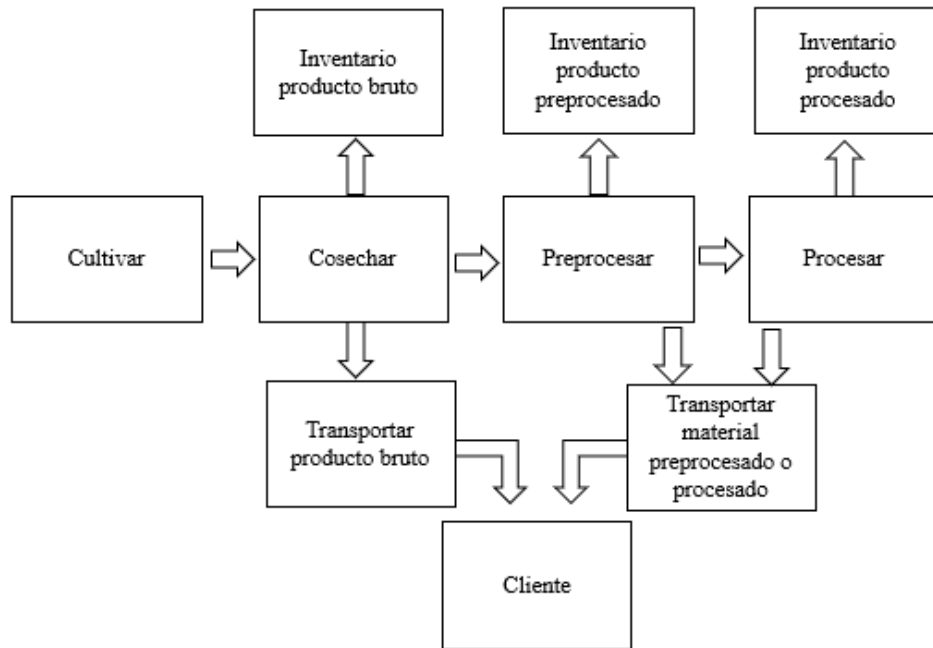
- Almacenar: Son locaciones de recolección que se pueden ubicar en distintos puntos de la cadena agroalimentarias, en esta etapa se puede deteriorar la producción ([Kusumastuti , et al. 2016](#)).
- Transportar: Es la actividad que se da en varios puntos de la cadena ya sea en los cultivos, inventarios, instalaciones de procesamiento, pre-procesamiento y por último para llegar a los clientes, en la cual se trasladan los productos en cualquiera de sus clases, ya sea producto sin procesar, producto preprocesado o producto procesado ([Onggo , et al. 2019](#)).

2.7. Relación Jerárquica en Cadenas Agroalimentarias

La relación jerárquica entre las etapas y las actividades de la empresa en el proceso productivo inicia con la etapa de cultivo donde se elige dónde y qué cultivar, que incluye la mantención de esta para obtener frutos. En el periodo de maduración del cultivo se continúa con la cosecha de este, luego se procede a la fase de producción del cultivo que posee actividades como el preprocesamiento y procesamiento de este transformándolo en el producto final

ofrecido, que luego es distribuido al cliente. Cabe destacar que las actividades de transporte y almacenaje se encuentran presentes en todas las etapas del proceso descrito, por lo que cuentan con variadas intervenciones dentro de los procesos ([Kusumastuti , et al. 2016](#)).

Figura 2.2: Relación jerárquica de actividades cadenas agroalimentaria



Nota. Relación jerárquica de las actividades descritas en 2.6. Fuente:Elaboración Propia.

2.8. Modelos Matemáticos en las Cadenas Agroalimentarias

Los modelos matemáticos son utilizados en cada sección de las cadenas agroalimentarias, dentro de estos modelos se pueden diferenciar por variadas características, tal como, los tipos de producto, nivel de decisión de los modelos, certeza de los parámetros utilizados, métodos de programación utilizado y tipo de aplicación de los modelos.

Los tipos de productos a modelar en una cadena agroalimentaria pueden ser perecibles o no perecibles, dentro de los modelos de productos frescos estudiados se encuentran manzanas

(Gómez-Lagos , et al. 2021; González-Araya , et al. 2015; Soto-Silva , et al. 2017),caña de azúcar (Aliano Filho , et al. 2021; Gilani & Sahebi, 2020; Jena & Poggi, 2013; Junqueira & Morabito, 2019; Sethanan & Neungmatcha, 2016),uvas (Ampatzidis , et al. 2014; Avanzini , et al. 2021; Bohle , et al. 2010; Ferrer , et al. 2008), entre otros.

Estos modelos se encuentran asociados a las etapas de producción dentro de la empresa, entre ellos la etapa de cosecha (Escallón-Barrios , et al. 2020; Gómez-Lagos , et al. 2021; González-Araya , et al. 2015; Junqueira & Morabito, 2019), cultivo (Albornoz & Zamora, 2021; Huang , et al. 2020), inventario (Lodree & Uzochukwu, 2008; Onggo , et al. 2019),transporte (Aliano Filho , et al. 2021; Peng & Vougioukas, 2020; van Klompenburg , et al. 2020) y procesamiento (Grillo , et al. 2017; Santos , et al. 2022).

Los niveles de decisión dentro de una empresa se dividen en estratégicos, los cuales son a largo plazo y apuntan a los objetivos generales de la empresa; táctico, los cuales son la puesta en marcha de las decisiones estratégicas y distribuyen los recursos limitados; por último, se encuentran las decisiones operativas corresponden a las actividades diarias y rutinarias.

Hay una gran variedad de modelos matemáticos con distintos niveles de decisión dentro de las cadenas agroalimentarias, a nivel estratégico destaca Soto-Silva , et al.(2017); dentro de la categoría táctica se sitúan los modelos Albornoz y Ñanco(s.f.), Albornoz , et al.(2019), Albornoz y Zamora(2021), Aliano Filho , et al.(2021),entre otros; en la clasificación de nivel operativo está Devapriya , et al.(2017), Herrera-Cáceres , et al.(2017), Lejarza y Baldea(2021), Risyahadi(2015), y demás; por último, se encuentra la combinación de los niveles anteriores Ampatzidis , et al.(2014), Bohle , et al.(2010), Escallón-Barrios , et al.(2020), Ferrer , et al.(2008), Gilani y Sahebi(2020), Jena y Poggi(2013), Jonkman , et al.(2019), Junqueira y Morabito(2019), Sethanan y Neungmatcha(2016), Volte , et al.(2020),entre otros.

Estos modelos también se pueden clasificar según la certeza en el valor de los parámetros utilizados pudiendo diferenciarse en determinista, donde todos los parámetros son conocidos con certeza; estocástico en los cuales los parámetros pueden ser inciertos o aleatorios; o híbrido los cuales poseen ambos elementos mencionados anteriormente ([Min & Zhou, 2002](#)).

En la revisión de literatura de [Behzadi , et al.\(2018\)](#). Se clasifican los distintos métodos de programación matemática en programación lineal/entera/mixta, programación no lineal, programación lineal multiobjetivo, modelos de simulación, optimización estocástica y optimización robusta. La programación lineal/entera/mixta se poseen poseen funciones objetivo y restricciones lineales, enteras o la combinación de estas, tal como los modelos propuestos por [Aliano Filho , et al.\(2021\)](#), [Esteso , et al.\(2021\)](#), [Soto-Silva , et al.\(2017\)](#). La programación no lineal es en la cual las funciones objetivo y/o las restricciones son no lineales, así como en [Aliano Filho , et al.\(2021\)](#). La programación lineal multiobjetivo es en la cual se utiliza más de una función objetivo, como en [Aliano Filho , et al.\(2021\)](#), [Jarumaneeroj , et al.\(2021\)](#), [Sethanan y Neungmatcha\(2016\)](#). Los modelos de simulación crean escenarios para representar los distintos comportamientos de distintos parámetros, observados en [Ampatzidis , et al.\(2014\)](#), [Baris Tan Nihan Condem\(s.f.\)](#), [Li , et al.\(2020\)](#). La optimización estocástica presenta algunos parámetros o coeficientes en la función objetivo inciertos, exhibidos en [Avanzini , et al.\(2021\)](#), [Baris Tan Nihan Condem\(s.f.\)](#), [Li , et al.\(2020\)](#), [Wang , et al.\(2020\)](#). La optimización robusta, en donde se asegura que la solución se acerca al óptimo y es casi factible para todos los escenarios utilizado en modelos como [Albornoz , et al.\(2019\)](#), [Bohle , et al.\(2010\)](#), [Gilani y Sahebi\(2020\)](#).

Los modelos matemáticos pueden o no aplicarse en una situación real en una cadena agroalimentaria, dado esto los modelos pueden aplicarse en casos de estudio, utilizado en

modelos como [Ampatzidis , et al.\(2014\)](#), [Jonkman , et al.\(2019\)](#), casos reales, en ([Escallón-Barrios , et al. 2020](#); [Gilani & Sahebi, 2020](#); [Herrera-Cáceres , et al. 2017](#)) o solo aplicación teórica como lo expuesto por [Iwanami , et al.\(2018\)](#), [Lejarza y Baldea\(2021\)](#), también se han observado casos en donde se emplea tanto en casos de estudio como reales [Jena y Poggi\(2013\)](#).

2.9. Modelo de Manejo de Cultivo por Zonificación

Un plan de cultivo es el cual se refiere a una selección de cultivos en el área espacial determinada y la distribución de estos. La importancia de la estructura de plantación del cultivo va desde un aspecto de productividad, económico, social hasta logístico ([Alemany , et al. 2019](#)).

Con el arribo de la agricultura de precisión se utilizaron nuevas herramientas que proporcionaron datos para mejorar las decisiones de los agricultores. Por lo que se implementó la división de los campos en zonas de manejo con características homogéneas, con el fin de manejar la variabilidad espacial en los cultivos ([Albornoz , et al. 2019](#)).

Dentro de las variadas formas de distribución de zonas de manejo se encuentra la distribución en forma de columnas paralelas con pasillos ([Peng & Vougioukas, 2020](#); [Volte , et al. 2020](#)) y la distribución con forma rectangular, esta última es en base parámetros de variabilidad espacial de propiedades específicas del suelo, a través de un modelo de programación entera binaria minimizando la cantidad de zonas resultantes o la suma de las varianzas internas de acuerdo con el indicador del suelo utilizado ([Cid-García NM, Albornoz V, 2013](#)). Este modelo se ha desarrollado para adaptarse a distintos escenarios, como las características de variabilidad en incertidumbre ([Albornoz , et al. 2019](#)), o restricciones de adyacencia para

familias de cultivos ([Albornoz & Zamora, 2021](#))).

2.10. Modelos de Programación de Cosecha Integrados

En la literatura hay variados modelos de programación de cosecha, estos determinan decisiones asociadas como la cantidad de empleados temporales y permanentes, presente en [Gómez-Lagos , et al.\(2021\)](#), [González-Araya , et al.\(2015\)](#), el uso de maquinaria presente en [Gómez-Lagos , et al.\(2021\)](#), [Goubaa , et al.\(2020\)](#), las rutas de transporte abarcadas en [Lejarza y Baldea\(2021\)](#), la compra de productos adicionales conjunto a transporte e inventario descritos en [Soto-Silva , et al.\(2017\)](#), patrones de cosecha y transporte analizados en [Ahumada y Villalobos\(2011\)](#), [Junqueira y Morabito\(2019\)](#), [Volte , et al.\(2020\)](#), grupos de transporte y reguladores de crecimiento observados en [Jena y Poggi\(2013\)](#), cosecha y recolección de bins contenido en [Ampatzidis , et al.\(2014\)](#), entre otros. La mayoría de estos corresponden a modelos bi-objetivo los cuales integran distintas etapas de decisión, tal como el modelo de cosecha y operación de transporte de [Aliano Filho , et al.\(2021\)](#), o el modelo de planificación de cultivos tomando en cuenta características de la cosecha de estos en [Huang , et al.\(2020\)](#); también con distintos tipos de cosecha para un mismo producto [Li , et al.\(2020\)](#), [Volte , et al.\(2020\)](#). Cabe destacar que hay modelos de cosecha que se especializan en características específicas de esta actividad, tal como la batería de las maquinas cosechadoras en un periodo dado estudiado por [Hasanloo , et al.\(2020\)](#) o la calidad deseada para la exportación [González-Araya , et al.\(2015\)](#).

2.11. Atributos Utilizados en Modelos de Cosecha

Los principales atributos utilizados en modelos de la etapa de cosecha se presentan a continuación.

- Horizonte de planificación: Ventana de tiempo en la que se realiza esta actividad, en la cual se debe lograr la mayor cantidad y calidad de la cosecha dentro del periodo disponible. Siendo este un objetivo propuesto, tal como en [Avanzini , et al.\(2021\)](#), [Jena y Poggi\(2013\)](#), incluso penalizable, observado en [Gómez-Lagos , et al.\(2021\)](#).
- Ventana de cosecha: Tiempo de cosecha específico para cada sección de cultivo o producto donde se puede cosechar([Alemany , et al. 2019](#)).Tomando en cuenta la maduración del producto, como lo analizado en [Baris Tan Nihan Condem\(s.f.\)](#) o el periodo de factibilidad de cosecha para cada lote, presente en [Herrera-Cáceres , et al.\(2017\)](#), [Junqueira y Morabito\(2019\)](#).
- Limitación de recursos: En la etapa de cosecha se utiliza una extensiva cantidad de recursos.Integrar límites de capacidad dentro de los modelos logra disminuir las pérdidas del cultivo. Límite de energía en maquinaria, tal como en [Goubaa , et al.\(2020\)](#); capacidad máxima de almacenamientos, presente en [Soto-Silva , et al.\(2017\)](#); límites de procesamiento, observados en [Jena y Poggi\(2013\)](#);mano de obra limitada, como en [Ahumada y Villalobos\(2011\)](#), [Ampatzidis , et al.\(2014\)](#), [Jena y Poggi\(2013\)](#);entre otros.
- Calidad de la cosecha: La falta de frescura o mala calidad de la fruta es un parámetro relevante, dado que puede transformarse en desecho y/o penalizarse([Ahumada & Villalobos, 2011](#)).La calidad puede representarse como funciones de decaimiento de esta,

- como en [Avanzini , et al.\(2021\)](#); como curva de maduración, observada en [Widodo , et al.\(2006\)](#); deterioro del producto, presente en [González-Araya , et al.\(2015\)](#); entre otras.
- Incertidumbre: La falta de certeza se refleja en las características del cultivo y cadena agroalimentaria. Tal como en la ventana de tiempo de cosecha, presente en [González-Araya , et al.\(2015\)](#); el impacto del clima en la pérdida del producto, observado en [Herrera-Cáceres , et al.\(2017\)](#); rendimiento de los recursos de cosecha y productividad de trabajadores, como en [Avanzini , et al.\(2021\)](#), [Bohle , et al.\(2010\)](#); demanda de los productos, observado en [Lodree y Uzochukwu\(2008\)](#); entre otros.
 - Control de inventario: El cual posee efecto en los costos del proceso y son parte de la principal causa de pérdida de productos en la producción [Dora , et al.\(2021\)](#). Dentro de los modelos se busca la minimización de estos, como en [Onggo , et al.\(2019\)](#); tomando en cuenta el deterioro de los productos en estos, como en [Lodree y Uzochukwu\(2008\)](#); inventario por tipo de cosecha, observado en [Li , et al.\(2020\)](#); entre otros.
 - Volumen cosechado y no cosechado: Decisiones de cantidades a cosechar de la disponible en el cultivo ([Alemany , et al. 2019](#)). Este volumen puede ser restringido por un límite máximo de demanda como en ([Ahumada & Villalobos, 2011](#)); por el uso de esta cantidad no cosechada para una producción futura, como en [Junqueira y Morabito\(2019\)](#); entre otros.
 - Desecho: Son productos que no se cosecharon al final del periodo de cosecha ([Alemany , et al. 2019](#)) y/o perdido a lo largo de la cadena agroalimentaria ([Esteso , et al. 2021](#)). Es-

tos desechos son generalmente minimizados, como lo observado en [Gómez-Lagos , et al.\(2021\)](#), [Junqueira y Morabito\(2019\)](#), [Onggo , et al.\(2019\)](#).

- Transporte de productos y rutas de cosecha: Estas se encuentran incorporadas a través de limitaciones de tiempo de transporte, como en [Junqueira y Morabito\(2019\)](#); límites de consumo de bencina y velocidad de cosecha, observados en [Jarumaneeroj , et al.\(2021\)](#); límites de carga en los envíos de producto, presentes en [Ahumada y Villalobos\(2011\)](#); bins o bandejas a transportar, como en los modelos [Ampatzidis , et al.\(2014\)](#), [Peng y Vougioukas\(2020\)](#); destinos de transporte de productos, como en [Ris Yahadi\(2015\)](#); itinerario de cosecha, observado en [Hajimirzajan , et al.\(2021\)](#); itinerario de modos de cosecha con maquinarias, abordado en [Volte , et al.\(2020\)](#); entre otros.

2.12. Calidad de Producción en Cadenas Agroalimentarias

Uno de los desafíos en las cadenas agroalimentarias es la reducción en el desperdicio de alimentos. En 2019 se estima que 931 millones de toneladas se desperdiciaron en productos alimenticios ([United Nations Environment Programme, 2021](#)), el 55 % de los alimentos que más se desechan corresponden a frutas y hortalizas. Una causa dentro de las pérdidas de producción es la no cosecha de productos dado a que no cumplen los estándares de calidad propuestos ([ODEPA, 2019b](#)).

La calidad debe ser suficiente y debe asegurarse en toda la cadena, dependiendo de los parámetros del producto en específico. El fin de esto es la satisfacción del cliente y las guías de seguridad alimentaria requeridas ([Lejarza & Baldea, 2021](#)). El producto dentro de la cadena agroalimentaria se encuentra vivo y evoluciona ([Van Der Vorst , et al. 2009](#)). Al momento de

la cosecha la calidad de la fruta es determinada, dada que la acumulación de materia seca (comparación de la masa seca comparada con la masa fresca) y agua se detienen al recoger esta.

Dentro de los modelos de decisión al incluir la calidad aumenta de manera significativa la complejidad del modelo. Por lo tanto se utiliza el concepto de vida útil en la cual el producto permanece seguro y mantiene ciertas características que cumplen un nivel nutricional ([Kingdom Institute of Food Science y Technology \(United Kingdom\), s.f.](#)). Esta noción de la calidad requiere cálculos complejos y los atributos en este tiempo poseen cierto nivel de incertidumbre, por lo que se incurren en pérdidas, las cuales se toman en cuenta en los modelos como proporción en el concepto de vida útil fija ([Janssen , et al. 2016](#)). También se puede modelar la calidad en función de los rasgos del fruto, tal como el color de la pulpa y sólidos solubles totales; o a través de herramientas como el índice NIRS (espectroscopia de infrarrojo cercano), observado en [Nordey , et al.\(2019\)](#).

Además la calidad se puede describir como una función de la pérdida de esta. Al utilizar un factor que sanciona la desviación de la fecha óptima de cosecha en la utilidad obtenida, tal como lo presentado por [Ferrer , et al.\(2008\)](#) o un porcentaje menor de productividad del campo dada la cosecha de frutos sobre maduros y/o podridos mencionado por [Escallón-Barrios , et al.\(2020\)](#). También puede describirse como un vector de atributos que varían en el tiempo con condiciones ambientales manipuladas y atributos de calidad, como en [Lejarza y Baldea\(2021\)](#). [Jonkman , et al.\(2019\)](#) propone que estas percepciones de la calidad son excluyentes y equivalentes, creando restricciones para estos casos en su modelo de diseño de cadena agroalimentaria en la etapa de cosecha.

2.13. Procesos de Extensión de Vida Útil

Luego de la cosecha la respuesta metabólica de la fruta es empezar su proceso de deterioro, este proceso no puede detenerse solo puede controlarse con el fin de retrasarlo. Por lo tanto la fruta solo puede conservar su calidad comestible durante un tiempo definido (Md Nor & Ding, 2020). Este deterioro se debe principalmente a la pérdida de agua, cambios bioquímicos y pérdida de nutrientes, como vitaminas, minerales, fibras dietéticas, carbohidratos, entre otros (Babu Perumal , et al. 2021).

En la industria alimentaria la conservación de las frutas después de la cosecha es un reto (Babu Perumal , et al. 2021). Por esto, las mejoras en la manipulación posterior a la cosecha y las nuevas tecnologías para prolongar la vida útil sin comprometer su calidad son fundamentales para resolver este problema (Babu Perumal , et al. 2021; Md Nor & Ding, 2020). Se emplean varios tipos de tratamientos físicos y químicos para controlar el deterioro y mejorar la vida útil de los productos agrícolas (Batool , et al. 2022).

Algunos de los tratamientos utilizados para controlar el deterioro de la fruta son las modificaciones de la composición de la atmósfera, técnicas de envasado, aceites esenciales y tratamientos de recubrimiento. Las modificaciones en la composición de la atmósfera de almacenamiento de productos ralentizan las reacciones enzimáticas que deterioran la fruta (Mworia , et al. 2012), a través de técnicas como atmósfera controlada, envasado de atmósfera modificada y el almacenamiento en frío. Las técnicas de envasado utilizan distintos materiales (proteínas, polímeros, lípidos, polisacáridos, etc.) que aumentan la vida útil dando una seguridad garantizada a través de la película que reduce pérdidas (McDaniel , et al. 2019). Los aceites esenciales derivados de las plantas sirven para gestionar los patógenos, dado que

poseen un alto contenido de compuestos antimicrobianos y antioxidantes que pueden mejorar la vida útil de las frutas y verduras sin afectar a su calidad ([Babu Perumal , et al. 2021](#)). Los tratamientos de recubrimiento se realizan con distintos materiales para diferentes tipos de frutas y verduras ([Md Nor & Ding, 2020](#)), estos materiales poseen eficacia para cada producto y se formulan como soluciones líquidas ([Ncama , et al. 2018](#)), esta técnica controla los factores intrínsecos de la fruta que son responsables de la pérdida de humedad al reducir las tasas de respiración y transpiración ([Md Nor & Ding, 2020](#)).

2.14. Enfoque Integrado en Modelos de Cosecha

El modelo propuesto por [Albornoz , et al.\(2021\)](#) corresponde a un modelo integral de cosecha y zonificación, que toma en cuenta agrupaciones de celdas homogéneas, cantidad de trabajadores de distintos tipos y viajes de recolección entre las zonas y el depósito.

En [Jonkman , et al.\(2019\)](#) se toman decisiones de cosecha, procesamiento, transporte e inventario de materiales brutos, semiprocesados y terminados; considerando calidad de productos, capacidades y demandas.

El modelo de cosecha de caña de azúcar presente en [Junqueira y Morabito\(2019\)](#) minimiza los desplazamientos dada la cosecha, pérdidas de producción y materia prima no cosechada en los campos durante la temporada, tomando en cuenta ventanas de tiempos y demanda de molinos.

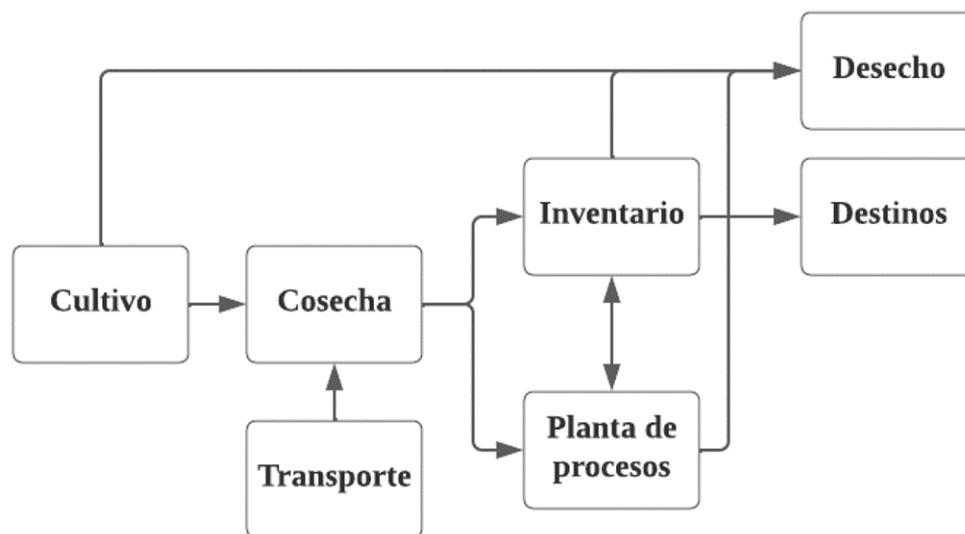
[Huang , et al.\(2020\)](#) propone un modelo integrado que maximiza las utilidades; en este se determinan los cultivos y el tiempo a plantar, considerando múltiples periodos de cosecha y valores de mercado.

Las agrupaciones de celdas homogéneas, cantidad de trabajadores, transporte de recolección de productos, ventanas de tiempo, capacidades de procesamiento, inventarios de distintos tipos de materiales, demandas, maximización de utilidades, minimización de productos no cosechado y pérdidas de producción son abordados en el trabajo a continuación.

3. Metodología

En este capítulo se presentan los modelos propuestos para apoyar las decisiones operacionales asociadas a la cosecha del productor de fruta fresca dentro de la cadena agroalimentaria presente a continuación.

Figura 3.1: Cadena agroalimentaria modelada.



Nota. Se presenta las actividades y flujo de productos de la cadena agroalimentaria abordadas en el modelo. Fuente: Elaboración propia

La cadena agroalimentaria modelada considera un productor de fruta fresca que posee una planta de procesos, la cual extiende la vida útil del producto. El productor utiliza una empresa externa para el packing de sus productos, que diferencia entre los requerimientos de sus destinos; además sus productos son enviados a través del puerto de Valparaíso y sus contratos de exportación son de venta firme que poseen una cláusula de satisfacción de demanda requerida, la cual penaliza la demanda no satisfecha.

El objetivo del modelo es maximizar las utilidades obtenidas, a través de la venta de la fruta, y poder generar una programación operativa de cosecha tomando en cuenta que se poseen distintos tamaño del campo, diferencias de variabilidad presente en este, variedad de perecibilidad de la fruta cultivada y niveles de satisfacción de demanda con envíos tanto nacionales como internacionales.

La metodología se divide en modelo jerárquico y modelo integrado. El primer modelamiento del problema es de manera jerárquica, este se compone del modelo de zonificación y modelo de programación de cosecha detallada, resueltos de manera secuencial. El segundo modelo cuenta con el formulación del modelo integrado, dada la toma de decisiones conjunta de los dos modelos y con una única resolución.

3.1. Enfoque Jerárquico

El primer modelo es una variación del modelo de zonificación utilizado en [Albornoz , et al.\(2021\)](#), el segundo corresponde al propuesto para la programación detallada de la cosecha en la cadena agroalimentaria de productos frescos, presentada en [3.1.2](#).

3.1.1. Modelo de Zonificación

Para este modelo se considera un campo de monocultivo de productos frescos que se encuentra dividido en celdas, cada una de estas celdas son cuadradas de 400 m^2 y se encuentran asociada a un punto de muestreo en el campo, el cual posee un valor del índice NDVI medido. A su vez se presentan zonas de manejo potenciales que pueden estar compuestas por una o varias celdas del campo y corresponden a cada posible combinación de celdas que forman una zona ,se obtienen a través del algoritmo desarrollado por [Cid-García NM, Albornoz V\(2013\)](#).

Conjuntos

Z = zonas potenciales del modelo, con $Z \in [1, zp]$.

Ce = celdas o puntos muestrales en el campo, con $Ce \in [1, ns]$.

Parámetros

zp = número de zonas potenciales.

ns = número de celdas o puntos muestrales en el campo.

α = nivel de homogeneidad requerida.

σ_{total}^2 = índice de varianza total en el campo.

σ_z^2 = índice de varianza de cada zona potencial en el campo.

$a_{z,ce}$ = matriz binaria de pertenencia de celdas ce a zonas potenciales z .

c_z = costo de manejo zona z .

cf = costo de elección de zona.

Variables

Q_z = Binaria de decisión que toma el valor 1 si la zona potencial z es parte de la partición final 0 si no.

Función Objetivo

$$\min \sum_{z \in Z} [c_z + cf] Q_z \quad (1)$$

Restricciones

$$\sum_{z \in Z} a_{ce,z} Q_z = 1 \quad \forall ce \in Ce \quad (2)$$

$$\sum_{z \in Z} ((n_z - 1) \sigma_z^2 + (1 - \alpha) \sigma_{\text{total}}^2) Q_z \leq (1 - \alpha) \sigma_{\text{total}}^2 ns \quad (3)$$

$$Q_z \in \{0, 1\} \quad (4)$$

La función objetivo (1) busca la minimización de los costos variables y costo fijos de la elección de zonas en el campo. La restricción (2) garantiza que todas las celdas de la partición se encuentren en una zona de la partición, en cuanto a la restricción (3) corresponde a la linealización de la ecuación de la varianza relativa presente en A.1, la cual asegura un nivel de homogeneidad mínimo requerido.

3.1.2. Modelo de Cosecha

La cadena agroalimentaria modelada observada en la Figura 3.1, presenta distintos supuestos según la etapa de en la que se encuentra.

- Etapa de cultivo: Cada zona posee valores NDVI, un punto de maduración máxima en el campo medible y una vida útil promedio de sus frutos de cada zona escogida.
- Etapa de cosecha: Se distinguen dos tipos de trabajadores, los catalogados como permanentes, los cuales se mantienen constantes en todo el horizonte de cosecha, y los trabajadores catalogados como temporales, los que poseen contratos diarios; además de una ventana de factibilidad de cosecha para cada zona.
- Etapa de transporte: Los puntos de recolección de las zonas se encuentran en el punto más alejado de la bodega, siendo esta última ubicada a 300 metros de la zona de cultivo,

y pueden ser transportados a esta en menos de un periodo.

- Etapa de inventario: Solo se posee una bodega en la cual pueden ser diferenciables los tipos de productos y bien mantenidos.
- Etapa de procesamiento: Existe una capacidad máxima de productos procesados y el transporte entre inventarios y planta de procesos puede ser realizado en menos de un día.
- Etapa de satisfacción de demanda: Los productos son enviados a la empresa de packing correspondiente en el último periodo del horizonte de planificación, estos productos cuentan con 5 días de vida útil adicional para los procesos de empaque y trámites de envío, adicionalmente los productos cuentan con 10 días de consumo mínimo en el lugar de destino.

Conjuntos

Z^* = zonas obtenidas del modelo de zonificación, con $z \in Z^*$.

T = horizonte de planificación en días, con $t \in [1, tl]$.

$T1 = \{0\} \cup T$ subconjunto de T .

$T2 = \{0, tl + 1\} \cup T$ subconjunto de T .

S = vida útil del producto sin procesar, con $s \in [smin, smax]$.

$S1 = \{smax + 1\} \cup S$, subconjunto de S .

Sp = vida útil del producto procesado, con $sp \in [smin, smax + sa]$.

$Sp1 = \{smax + sa + 1\} \cup Sp$, subconjunto de Sp .

Parámetros

tl = periodo final del horizonte de planificación.

sa = periodos adicionales de vida útil obtenida a través del procesamiento.

sp = salario trabajador permanente en un periodo.

st = salario trabajador temporal en un periodo.

pt = productividad de trabajadores temporales en un periodo [Kg].

pp = productividad de trabajadores permanentes en un periodo [Kg].

$tw_{\max}$ = cantidad máxima de trabajadores temporales.

tc_z = costo de transporte a zona z .

tt_z = tiempo de transporte a zona z en horas.

vc_{max} = capacidad máxima de transporte en un vehículo [Kg].

th_t = tiempo en horas disponible de viajes en un periodo.

b_{zt} = matriz binaria de idoneidad de cosecha de zona z en periodo t .

p_z = producción total de zona z .

msc_{max} = capacidad de inventario máximo [Kg] en un periodo.

pc = costo de proceso [Kg].

$cp_{\max}$ = capacidad máxima de procesamiento [Kg].

$smin$ = vida útil mínima del producto.

$smax$ = vida útil máxima del producto.

$smax_z$ = vida útil máxima del producto por zona z .

ic = costo de producto en inventario.

tf_z = periodo final de temporada de cosecha zona z .

ths_z = periodo de inicio de cosecha para zona z .

d_s = demanda con vida útil s .

p_s = precio de venta del producto con vida útil s .

cud_s = costo de demanda insatisfecha con vida útil s .

wc = costo de desechar kg de productos.

wcz = costo de no cosechar kg de productos de zona.

Variables

$X_{z,t,s}$ = Kg de producto cosechados en la zona z en periodo t .

$Y_{z,t,s}$ = Kg de producto en la zona z al final del periodo t .

$NT_{z,t}$ = Número de viajes utilizados para cosechar en la zona z en periodo.

PW = cantidad de trabajadores permanentes.

TW_t = Trabajadores temporales en el periodo t .

CTW_t = Trabajadores temporales contratados al inicio del periodo t .

HTW_t = Trabajadores temporales despedidos al final del periodo t .

$UP_{z,t,s}$ = Kg de producto no procesado cosechado en la zona z en el periodo t y con vida útil s .

$PTP_{z,t,s}$ = Kg de producto a procesar cosechado en la zona z en el periodo t y con vida útil s .

$PP_{z,t,s}$ = Kg de producto procesado cosechado en la zona z en el periodo t y con vida útil s .

$IUP_{t,s}$ = Inventario de producto no procesado al final del periodo t con vida útil s .

$IPP_{t,s}$ = Inventario de producto procesado al final del periodo t con vida útil s .

ITP_{ts} = Inventario de producto a procesar al final del periodo t con vida útil s .

WC_z = Kg de producto no cosechado desechado en zona z .

$WIUP_t$ = Kg de producto desechado en el inventario de productos no procesados en

periodo t .

$WITP_t$ =Kg de producto desechado en el inventario de productos a procesar en periodo t .

WIP_t =Kg de producto desechado en el inventario de productos procesados en periodo t .

WT_t =Kg de producto desechado en los inventarios de productos totales en periodo t .

UD_s =K g de demanda no satisfecha de productos con vida útil s .

MD_s =Kg de demanda satisfecha de productos con vida útil s .

$SUP_{s,sd}$ =Kg de ventas de productos no procesados con vida útil s que satisfacen la demanda con vida útil sd .

$SP_{s,sd}$ =Kg de ventas de producto procesado con vida útil s que satisfacen la demanda con vida útil sd .

Función Objetivo

$$\begin{aligned}
 \text{Máx} \sum_{s \in Sp} p_s MD_s - \sum_{s \in Sp} cud_s UD_s - \sum_{t \in T} \sum_{s \in Sp} pc PP_{ts} - \\
 \sum_{t \in T} \sum_{z \in Z^*} tc_z NT_{zt} - spPw - \sum_{t \in T} stTW_t - \\
 \sum_{t \in T1} \sum_{s \in Sp1} icIPP_{t,s} - \sum_{t \in T1} \sum_{s \in S1} icIUP_{t,s} - \sum_{t \in T1} \sum_{s \in S1} icITP_{ts} - \\
 \sum_{t \in T2} wcWT_t - \sum_{z \in Z^*} wcZC_z \quad (5)
 \end{aligned}$$

Restricciones

$$Y_{z,ths_{z-1},smax_z+1} = p_z \quad \forall z \in Z^* \quad (6)$$

$$Y_{z,t,s} = 0 \quad \forall z \in Z^*, \forall t < ths_z - 1, \forall s \in S1 \neq smax_z + 1 \quad (7)$$

$$Y_{z,t,s} = 0 \quad \forall z \in Z^*, \forall ths_z \leq t \leq tf_z, \forall s \in S1 > smax_z \quad (8)$$

$$Y_{z,t,s} = 0 \quad \forall z \in Z^*, \forall t > tf_z, \forall s \in S1 \quad (9)$$

$$Y_{z,t,s} = Y_{z,t-1,s+1} - X_{z,t,s} \quad \forall ths_z \leq t \leq tf_z, \forall s \in S, \forall z \in Z^* \quad (10)$$

$$\sum_{s \in S} X_{z,t,s} \leq p_z b_{z,t} \quad \forall z \in Z^*, \forall t \in T \quad (11)$$

$$X_{z,t,s} = PTP_{z,t,s} + UP_{z,t,s} \quad \forall t \in T, \forall z \in Z^*, \forall s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{z \in Z^*} \sum_{s \in S} X_{z,t,s} \leq ppPW + ptTW_t \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$TW_t = TW_{t-1} - HTW_{t-1} + CTW_t \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$TW_t \leq tw_{\max} \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$TW_0 = 0 \quad (16)$$

$$HTW_0 = 0 \quad (17)$$

$$MD_s + UD_s = d_s \quad \forall s \in Sp \quad (18)$$

$$\sum_{s \in [sd, smax+sa]} SP_{s,sd} + \sum_{s \in [sd, smax]} SUP_{s,sd} = MD_{sd} \quad \forall sd \in S \quad (19)$$

$$\sum_{s \in [sd, smax+sa]} SP_{s,sd} = MD_{sd} \quad \forall t \in T, \forall s \in Sp - S \quad (20)$$

$$IUP_{t,s} = IUP_{t-1,s+1} + \sum_{z \in Z^*} UP_{z,t,s} - WIUP_t \quad \forall t \in [1, tl-1], \forall s \in S \quad (21)$$

$$IUP_{tl,s} = IUP_{tl-1,s+1} + \sum_{z \in Z^*} UP_{z,tl,s} - WIUP_{tl} - \sum_{sd \in [smin,s]} SUP_{s,sd} \quad \forall s \in S \quad (22)$$

$$IUP_{t,smax+1} = 0 \quad \forall t \in T \quad (23)$$

$$ITP_{t,s} = ITP_{t-1,s+1} + \sum_{z \in Z^*} PTP_{z,t,s} - WITP_t - PP_{t,s+sa} \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (24)$$

$$ITP_{t,smax+1} = 0 \quad \forall t \in T \quad (25)$$

$$IPP_{t,s} = IPP_{t-1,s+1} + PP_{t,s} - WIP_t \quad \forall t \in [1, tl - 1], \forall s \in Sp \quad (26)$$

$$IPP_{tl,s} = IPP_{tl-1,s+1} + PP_{tl,s} - WIP_{tl} - \sum_{sd \in [smin, s]} SP_{s,sd} \quad \forall s \in Sp \quad (27)$$

$$IPP_{t,smax+sa+1} = 0 \quad \forall t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{s \in Sp} IPP_{t,s} + \sum_{s \in S} IUP_{t,s} + \sum_{s \in S} ITP_{t,s} \leq msc_{max} \quad \forall t \in T \quad (29)$$

$$\sum_{s \in Sp} PP_{t,s} \leq cp_{max} \quad \forall t \in T \quad (30)$$

$$PP_{t,s} = 0 \quad \forall t \in T, \forall s < smin + sa \in Sp \quad (31)$$

$$\sum_{s=smin}^{smax_z} X_{z,t,s} \leq NT_{z,t}vc_{max} \quad \forall t \in T, \forall z \in Z^* \quad (32)$$

$$\sum_{z \in Z^*} tt_z NT_{z,t} \leq th_t \quad \forall t \in T \quad (33)$$

$$WC_z = p_z - \sum_{t=ths_z}^{tf_z} X_{z,t,smax_z-(t-ths_z)} \quad \forall z \in Z^* \quad (34)$$

$$WIUP_t = IUP_{t-1,min} \quad \forall t \in T \quad (35)$$

$$WIUP_{tl+1} = \sum_{s \in S} IUP_{tl,s} \quad (36)$$

$$WITP_t = ITP_{t-1,min} \quad \forall t \in T \quad (37)$$

$$WITP_{tl+1} = \sum_{s \in S} ITP_{tl,s} \quad (38)$$

$$WIP_t = IPP_{t-1,min} \quad \forall t \in T \quad (39)$$

$$WIP_{tl+1} = \sum_{s \in Sp} IPP_{tl,s} \quad (40)$$

$$WT_t = WIUP_t + WITP_t + WIP_t \quad \forall t \in T \quad (41)$$

$$IUP_{0s} = 0 \quad \forall s \in S1 \quad (42)$$

$$ITP_{0s} = 0 \quad \forall s \in S1 \quad (43)$$

$$IPP_{0s} = 0 \quad \forall s \in Sp1 \quad (44)$$

$$X_{z,t,s}, Y_{z,t,s}, UP_{z,t,s}, PTP_{z,t,s}, PP_{z,t,s}, IUP_{z,t,s}, ITP_{z,t,s}, IPP_{z,t,s} \in R_0^+ \quad (45)$$

$$WC_z, WIUP_t, WITP_t, WIP_t, WT_t, UD_s, MD_s, SUP_{s,sd}, SP_{s,sd} \in R_0^+ \quad (46)$$

$$TW_t, NT_{zt}, CTW_t, HTW_t \in Z^0 \quad (47)$$

La función objetivo del modelo busca maximizar la utilidad (5). La restricción (6) asigna la vida útil inicial y producción total por cosechar al final del periodo en el cultivo, la ecuación (7), (8) y (9) aseguran que no se encuentra cultivo disponible para cosechar en otro periodo que el indicado ni con otra vida útil. La ecuación (10) realiza el balance de los frutos disponibles en el cultivo al final del periodo luego de ser cosechado. La restricción (11) limita los productos cosechados a la ventana de cosecha de cada zona y en la ecuación (12) los frutos cosechados son distinguidos por producto a procesar y no procesado. La restricción (13) presenta el límite de rendimiento diario de los trabajadores tanto permanentes como temporales para la cantidad de cosecha. La ecuación (14) presenta el balance de los trabajadores temporales dadas las variables de contrato y despido del periodo, en la restricción (15)

se observa el límite de contratación diario de este tipo de trabajador, conjunto a estas las ecuaciones (16) y (17) indican los trabajadores temporales presentes y despedidos al inicio del horizonte de planificación.

La restricción (18) distingue la demanda requerida entre demanda insatisfecha o satisfecha. Esta última es definida por las ecuaciones (19) y (20), la primera corresponde a la satisfacción de la demanda de productos cuya vida útil se encuentra disponible en el campo a través de productos con y sin procesamiento con una vida útil mayor o igual a la requerida, la siguiente corresponde a la satisfacción de la demanda del producto que requiere procesamiento con productos que poseen una vida útil mayor o igual a la requerida.

Las restricciones (21) y (22) corresponde al balance del inventario de los productos no procesados. La primera contiene el inventario al final en el periodo anterior, a la cual se le añaden los productos no procesados cosechados en el periodo, eliminando los desechos del inventario del periodo. La segunda corresponde al balance de inventario de estos productos en el periodo final del horizonte de planificación, la cual contiene el inventario al final en el periodo anterior, a la cual se le añaden los productos no procesados cosechados en el periodo, eliminando los desechos del inventario del periodo y extrayendo las ventas totales de los productos no procesados que satisfacen distintos destinos con la vida útil presente del inventario. Se restringe el inventario de productos no procesados a productos que no superan la vida útil máxima disponible en el campo en la ecuación (23), conjunto a esta la restricción (42) impone un nulo inventario inicial antes del periodo de cosecha.

El balance del inventario de los productos a procesar esta representado en la restricción (24) que incluye el inventario del periodo anterior, incorporando los productos a procesar cosechados en el periodo, descarta los desechos del inventario del periodo y extrae los productos

que luego pasan al procesamiento. La ecuación (25) restringe este inventario a productos que no superan la vida útil máxima disponible en el campo, junto a esta se asigna nulo inventario inicial en la ecuación (43).

Las ecuaciones (26) y (27) corresponden al balance del inventario de los productos procesados. La primera incorpora el inventario del periodo anterior, incluyendo los productos procesados del periodo, extrayendo los desechos del inventario del periodo. La segunda corresponde al balance de inventario de los productos procesados en el periodo final, la cual incorpora los elementos de la ecuación anterior, extrayendo además las ventas totales de productos procesados que satisfacen destinos con diversas vidas útiles con la vida útil presente en este. La restricción (28) indica que en el inventario no existen productos que superen la vida útil máxima obtenida a través del procesamiento en la ecuación, la ecuación (44) indica que no hay inventario inicial antes del periodo de cosecha. La restricción (29) limita la cantidad de inventario dada una capacidad máxima de bodega.

La capacidad máxima de procesamiento diario se observa en la ecuación (30), además la restricción (31) impone que los productos procesados no pueden tener una vida útil menor a la vida útil mínima del campo incluyendo la extensión de vida útil dada por el procesamiento.

Los viajes realizados para la recolección de los productos cosechados se encuentran limitados por las restricciones (32) y (33). La primera impone un límite máximo de productos cosechados dada la capacidad máxima de los vehículos utilizados; en cambio la segunda ecuación impone un límite dado los tiempos de viaje que deben corresponder a las horas disponibles en el periodo de la flota vehicular.

La restricción (34) indica que los productos desechados en las zonas de cultivo corresponden a los productos en el campo que no fueron cosechados en la ventana de tiempo apta para

esta actividad. Las ecuaciones (35) y (36) expone que los desechos de inventario de productos no procesados corresponden a los items en inventario que alcanzaron su vida útil mínima y no pueden ser consumidos, junto a los productos en inventario al final del horizonte de planificación. Esto se replica con las restricciones (37) y (38) para los desechos de inventario de productos a procesar, junto a a las ecuaciones (39) y (40). Además la restricción (42) define a la variable de desechos totales como la sumatoria de los desechos de los inventarios en el periodo. Por último, se presentan las restricciones (43), (44) y (45), las cuales nos indican a que conjunto pertenecen las variables $'$, siendo estas dos primeras de pertenencia al conjunto de reales no negativos que incluyen al cero y la tercera que corresponden a enteros que incluyen al cero.

3.2. Enfoque Integrado

En este enfoque se realiza la resolución de ambos modelos de forma simultánea, generando un modelo de zonificación y cosecha el cual mantiene los supuestos mencionados en cada modelo antes presentado en la sección 3.1.

Conjuntos

Z = zonas potenciales del modelo, con $Z \in [1, zp]$.

Ce = celdas o puntos muestrales en el campo, con $Ce \in [1, ns]$.

T = horizonte de planificación en días, con $t \in [1, tl]$.

$T1 = \{0\} \cup T$ subconjunto de T .

$T2 = \{0, tl + 1\} \cup T$ subconjunto de T .

S = vida útil del producto sin procesar, con $s \in [smin, smax]$.

$S1 = \{smax + 1\} \cup S$, subconjunto de S .

Sp = vida útil del producto procesado, con $sp \in [smin, smax + sa]$.

$Sp1 = \{smax + sa + 1\} \cup Sp$, subconjunto de Sp .

Parámetros

zp = número de zonas potenciales.

ns = número de celdas o puntos muestrales en el campo.

α = nivel de homogeneidad requerida.

σ_{total}^2 = índice de varianza total en el campo.

σ_z^2 = índice de varianza de cada zona potencial en el campo.

$a_{z,ce}$ = matriz binaria de pertenencia de celdas ce a zonas potenciales z .

c_z = costo de manejo zona z .

cf = costo de elección de zona.

tl = periodo final del horizonte de planificación.

sa = periodos adicionales de vida útil obtenida a través del procesamiento.

sp = salario trabajador permanente en un periodo.

st = salario trabajador temporal en un periodo.

pt = productividad de trabajadores temporales en un periodo [Kg].

pp = productividad de trabajadores permanentes en un periodo [Kg].

$tw_{\max}$ = cantidad máxima de trabajadores temporales.

tc_z = costo de transporte a zona z .

tt_z = tiempo de transporte a zona z en horas.

vc_{max} = capacidad máxima de transporte on un vehículo [Kg].

th_t = tiempo en horas disponible de viajes en un periodo.

b_{zt} = matriz binaria de idoneidad de cosecha de zona z en periodo t .

p_z = producción total de zona z .

msc_{max} = capacidad de inventario máximo [Kg] en un periodo.

pc = costo de proceso [Kg].

$cp_{\max}$ = capacidad máxima de procesamiento [Kg].

$smin$ = vida útil mínima del producto.

$smax$ = vida útil máxima del producto.

$smax_z$ = vida útil máxima del producto por zona z .

ic = costo de producto en inventario.

tf_z = periodo final de temporada de cosecha zona z .

ths_z = periodo de inicio de cosecha para zona z .

d_s = demanda con vida útil s .

p_s = precio de venta del producto con vida útil s .

cud_s = costo de demanda insatisfecha con vida útil s .

wc = costo de desechar kg de productos.

wcz = costo de no cosechar kg de productos de zona.

Variables

Q_z = Binaria de decisión que toma el valor 1 si la zona potencial z es parte de la partición final 0 si no.

$X_{z,t,s}$ = Kg de producto cosechados en la zona z en periodo t .

$Y_{z,t,s}$ = Kg de producto en la zona z al final del periodo t .

$NT_{z,t}$ = Número de viajes utilizados para cosechar en la zona z en periodo.

PW = cantidad de trabajadores permanentes.

TW_t = Trabajadores temporales en el periodo t .

CTW_t = Trabajadores temporales contratados al inicio del periodo t .

HTW_t = Trabajadores temporales despedidos al final del periodo t .

$UP_{z,t,s}$ = Kg de producto no procesado cosechado en la zona z en el periodo t y con vida útil s .

$PTP_{z,t,s}$ = Kg de producto a procesar cosechado en la zona z en el periodo t y con vida útil s .

$PP_{z,t,s}$ = Kg de producto procesado cosechado en la zona z en el periodo t y con vida útil s .

$IUP_{t,s}$ = Inventario de producto no procesado al final del periodo t con vida útil s .

$IPP_{t,s}$ = Inventario de producto procesado al final del periodo t con vida útil s .

ITP_{ts} = Inventario de producto a procesar al final del periodo t con vida útil s .

WC_z = Kg de producto no cosechado desechado en zona z .

$WIUP_t$ = Kg de producto desechado en el inventario de productos no procesados en periodo t .

$WITP_t$ = Kg de producto desechado en el inventario de productos a procesar en periodo t .

WIP_t = Kg de producto desechado en el inventario de productos procesados en periodo t .

WT_t = Kg de producto desechado en los inventarios de productos totales en periodo t .

UD_s = Kg de demanda no satisfecha de productos con vida útil s .

MD_s = Kg de demanda satisfecha de productos con vida útil s .

$SUP_{s,sd}$ = Kg de ventas de productos no procesados con vida útil s que satisfacen la demanda con vida útil sd .

$SP_{s,sd}$ = Kg de ventas de producto procesado con vida útil s que satisfacen la demanda con vida útil sd .

Función Objetivo

$$\begin{aligned}
 \text{Máx} \sum_{s \in Sp} p_s MD_s - \sum_{s \in Sp} cud_s UD_s - \sum_{t \in T} \sum_{s \in Sp} pc PP_{ts} - \\
 \sum_{t \in T} \sum_{z \in Z} tc_z NT_{zt} - spPw - \sum_{t \in T} stTW_t - \\
 \sum_{t \in T1} \sum_{s \in Sp1} icIPP_{t,s} - \sum_{t \in T1} \sum_{s \in S1} icIUP_{t,s} - \sum_{t \in T1} \sum_{s \in S} icITP_{tss} - \\
 \sum_{t \in T2} wcWT_t - \sum_{z \in Z} wc_z WC_z - \sum_{z \in Z} [c_z + cf] Q_z \quad (48)
 \end{aligned}$$

Restricciones

$$\sum_{z \in Z} a_{ce,z} Q_z = 1 \quad \forall ce \in Ce \quad (49)$$

$$\sum_{z \in Z} ((n_z - 1) \sigma_z^2 + (1 - \alpha) \sigma_{\text{total}}^2) Q_z \leq (1 - \alpha) \sigma_{\text{total}}^2 ns \quad (50)$$

$$Y_{z,ths_z-1,smax_z+1} = p_z Q_z \quad \forall z \in Z \quad (51)$$

$$Y_{z,t,s} = 0 \quad \forall z \in Z, \forall t < ths_z - 1, \forall s \in S1 \neq smax_z \quad (52)$$

$$Y_{z,t,s} = 0 \quad \forall z \in Z, \forall ths_z \leq t \leq tf_z, \forall s \in S1 > smax_z \quad (53)$$

$$Y_{z,t,s} = Y_{z,t-1,s+1} - X_{z,t,s} \quad \forall ths_z \leq t \leq tf_z, \forall s \in S, \forall z \in Z \quad (54)$$

$$\sum_{s \in S} X_{z,t,s} \leq p_z b_{z,t} \quad \forall z \in Z, \forall t \in T \quad (55)$$

$$X_{z,t,s} = PTP_{z,t,s} + UP_{z,t,s} \quad \forall t \in T, \forall z \in Z, \forall s \in S \quad (56)$$

$$\sum_{z \in Z} \sum_{s \in S} X_{z,t,s} \leq ppPW + ptTW_t \quad \forall t \in T \quad (57)$$

$$TW_t \leq tw_{\max} \quad \forall t \in T \quad (58)$$

$$TW_t = TW_{t-1} - HTW_{t-1} + CTW_t \quad \forall t \in T \quad (59)$$

$$TW_0 = 0 \quad (60)$$

$$HTW_0 = 0 \quad (61)$$

$$MD_s + UD_s = d_s \quad , \forall s \in Sp \quad (62)$$

$$\sum_{s \in [sd, smax+sa]} SP_{s,sd} + \sum_{s \in [sd, smax]} SUP_{s,sd} = MD_{sd} \quad \forall sd \in S \quad (63)$$

$$\sum_{s \in [sd, smax+sa]} SP_{s,sd} = MD_{sd} \quad \forall t \in T, \forall s \in Sp - S \quad (64)$$

$$IUP_{t,s} = IUP_{t-1,s+1} + \sum_{z \in Z} UP_{z,t,s} - WIUP_t \quad \forall t \in [1, tl-1], \forall s \in S \quad (65)$$

$$IUP_{tl,s} = IUP_{tl-1,s+1} + \sum_{z \in Z} UP_{z,tl,s} - WIUP_{tl} - \sum_{sd \in [smin,s]} SUP_{s,sd} \quad \forall s \in S \quad (66)$$

$$IUP_{t,smax+1} = 0 \quad \forall t \in T \quad (67)$$

$$ITP_{t,s} = ITP_{t-1,s+1} + \sum_{z \in Z} PTP_{z,t,s} - WITP_t - PP_{t,s+sa} \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (68)$$

$$ITP_{t,smax+1} = 0 \quad \forall t \in T \quad (69)$$

$$IPP_{t,s} = IPP_{t-1,s+1} + PP_{t,s} - WIP_t \quad \forall t \in [1, tl-1], \forall s \in Sp \quad (70)$$

$$IPP_{tl,s} = IPP_{tl-1,s+1} + PP_{tl,s} - WIP_{tl} - \sum_{sd \in [smin,s]} SP_{s,sd} \quad \forall s \in Sp \quad (71)$$

$$IPP_{t,smax+sa+1} = 0 \quad \forall t \in T \quad (72)$$

$$\sum_{s \in Sp} IPP_{t,s} + \sum_{s \in S} IUP_{t,s} + \sum_{s \in S} ITP_{t,s} \leq msc_{max} \quad \forall t \in T \quad (73)$$

$$\sum_{s \in Sp} PP_{t,s} \leq cp_{max} \quad \forall t \in T \quad (74)$$

$$PP_{t,s} = 0 \quad \forall t \in T, \forall s < \text{smín} + sa \in Sp \quad (75)$$

$$\sum_{s=\text{smín}}^{\text{smáx}_z} X_{z,t,s} \leq NT_{z,t}vc_{\text{máx}} \quad \forall t \in T, \forall z \in Z \quad (76)$$

$$\sum_{z \in Z} tt_z NT_{z,t} \leq th_t \quad \forall t \in T \quad (77)$$

$$WC_z = p_z Q_z - \sum_{t=ths_z}^{tf_z} X_{z,t,\text{smáx}_z-(t-ths_z)} \quad \forall z \in Z^* \quad (78)$$

$$WIUP_t = IUP_{t-1,\text{smín}} \quad \forall t \in T \quad (79)$$

$$WIUP_{tl+1} = \sum_{s \in S} IUP_{tl,s} \quad (80)$$

$$WITP_t = ITP_{t-1,\text{smín}} \quad \forall t \in T \quad (81)$$

$$WITP_{tl+1} = \sum_{s \in S} ITP_{tl,s} \quad (82)$$

$$WIP_t = IPP_{t-1,\text{smín}} \quad \forall t \in T \quad (83)$$

$$WIP_{tl+1} = \sum_{s \in Sp} IPP_{tl,s} \quad (84)$$

$$WT_t = WIUP_t + WITP_t + WIP_t \quad \forall t \in T \quad (85)$$

$$IUP_{0s} = 0 \quad \forall s \in S1 \quad (86)$$

$$ITP_{0s} = 0 \quad \forall s \in S1 \quad (87)$$

$$IPP_{0s} = 0 \quad \forall s \in Sp1 \quad (88)$$

$$Q_z \in \{0, 1\} \quad (89)$$

$$X_{z,t,s}, Y_{z,t,s}, UP_{z,t,s}, PTP_{z,t,s}, PP_{z,t,s}, IUP_{z,t,s}, ITP_{z,t,s}, IPP_{z,t,s} \in R_0^+ \quad (90)$$

$$WC_z, WIUP_t, WITP_t, WIP_t, WT_t, UD_s, MD_s, SUP_{s,sd}, SP_{s,sd} \in R_0^+ \quad (91)$$

$$TW_t, NT_{zt}, CTW_t, HTW_t \in Z^0 \quad (92)$$

La función objetivo (48) maximiza las utilidades para la empresa tal como en el modelo de cosecha 3.1.2 pero añadiendo en esta el costo de zonificación presente en el primer modelo de zonificación 3.1.1. La diferencia entre el enfoque jerárquico e integrado, se encuentran en las restricciones (51) y (78) en donde se incluye la variable binaria de decisión de partición Q_z , por lo que en la primera las zonas que no son elegidas para la partición final no poseen frutos disponibles para la cosecha y en la segunda ecuación solo las zonas elegidas para la partición final poseen frutos que al no cosechar son parte de los desechos de la cadena modelada. Las demás restricciones permanecen iguales a las descritas en la sección 3.1.2, exceptuando el cambio de subconjunto de zonas potenciales escogidas (Z^*) a zonas potenciales totales (Z).

4. Caso Estudio

El caso de estudio se realiza en el mercado de la uva de mesa en la variedad Red Globe, de un productor de la región de O'Higgins. Los costos por manejo de las zonas y costos por Kg de producto de zona no cosechada se definen por el gasto de insumos y su aplicación tales como fertilizantes, fungicidas, herbicidas, entre otros [ODEPA\(2021\)](#). Por otra parte los costos fijos asociados a la zonificación corresponden al promedio de costos fijos de zonas en todas las instancias presentes en [ODEPA\(2021\)](#). Por último, Los costos asociados a producto cosechado que no fue despachado se representan como el costo de oportunidad de venta de esos productos al precio promedio disponible dentro de los destinos escogidos.

La ventana de cosecha óptima es de 10 días, utilizada para la cosecha de este tipo de uva en San Fernando ([Torres , et al. 2017](#)). La vida útil empleada para la uva es la media medida en [Gao , et al.\(2013\)](#).

En cuanto al procesamiento de la uva se observa un aumento de vida útil al aplicar plasma de aire a presión atmosférica ([Moon , et al. 2016](#)), concentración de ozono gaseoso ([Valdiviezo , et al. 2016](#)), al emplear recubrimientos de quitosano ([Shao , et al. 2021](#)), de quitosano-glucosa ([Gao , et al. 2013](#)), entre otros. Este último se utiliza para una ampliación de la vida útil luego del procesamiento de 30 periodos, dada la aplicación de este recubrimiento de pectina y la aceptabilidad al límite del marketing expuesta en el artículo mencionado. Los costos asociados a este tipo de procesamiento se encuentran en Anexos [A.3](#).

Tal como se observa en la tabla [4.1](#), la demanda es tanto internacional como nacional. En cuanto a la demanda nacional es la obtenida a través del consumo por habitante de 7,9 Kg ([ODEPA, 2012](#)) y la población de distintas zonas proyectadas ([Instituto Nacional de](#)

[Estadísticas, s.f.](#)), se excluye la zona austral de las demandas abordadas dada a la falta de información sobre los precios de la uva en el sector. La demanda internacional se obtiene a través del volumen exportado de la región de O'Higgins diferenciada por la vida útil requerida, de las principales destinos de consumo de la uva.

Los precios internacionales obtenidos de las uvas para este caso de estudio es un precio promedio, corresponden a los valores de la mercancía desde el lugar de producción a la puesta a bordo en el embarque, de los distintos tipos de uvas en la temporada 2021 exportados por la región a los destinos escogidos ([Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, s.f.-a](#)). Los precios nacionales son obtenidos a través de precios promedios de todo tipo de uvas de primera y segunda categoría en puntos de monitoreo de feria libre, mercados minoristas y supermercados ([Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, s.f.-b](#)).

Las vidas útiles requeridas por los distintos destinos, son obtenidas a través de los días promedios de viaje, no tomando en cuenta retrasos ocasionados por la pandemia, estos fueron obtenidos a través de la agencia TECOMEX en Valparaíso, por lo que se le agrega el tiempo promedio de viaje desde la viña a esta ciudad y los días añadidos debido al proceso de empaque y días mínimos de consumo.

Tabla 4.1: Demandas totales de la región de O'Higgins de la producción de uva de mesa considerando destinos, volúmenes totales y vida útil requerida del producto.

Destino	Precio	Volumen Total [Kg]	Vida útil requerida
Nacional	\$ 1.680	1.563.601	16
Brasil	\$ 1.107	6.938.718	30
Canadá	\$ 1.718	45.885.900	33
China	\$ 1.095	1.246.790	45
Colombia	\$ 1.412	6.073.538	25
Corea del Sur	\$ 1.777	2.437.321	60
Ecuador	\$ 1.183	67.759.982	22
Estados Unidos	\$ 1.333	121.403.743	31
Europa	\$ 1.230	37.925.829	44
Japón	\$ 2.001	914.372	55

Nota. Se presenta los principales destinos de demanda de la uva de mesa, con sus precios FOB correspondientes, volúmenes totales y vida útil requerida por el destino calculada por los días de viaje y 15 días de holgura, exportados desde la ciudad de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia

En este trabajo se consideran 10 instancias computacionales de plantaciones, abarcan una superficie entre 3,2 y 10,4 hectáreas.

Las demandas son razonadas según la producción total del campo en cada instancia, se realizan proyecciones de producción, vida útil, ventana de cosecha de cada zona potencial y se define el inicio de descuento de vida útil en el inicio de su ventana de cosecha. Se toman en cuenta las variabilidades presentes en las mediciones correspondiente a un 1 % en la vida útil promedio, un 10 % en la proyección del rendimiento del campo, conjunto a imprevistos que afecten la producción. Los parámetros utilizados se encuentran detallados en la sección Anexo [A.2](#).

5. Resultados y Análisis

En este capítulo se abordan los resultados de los modelos de las secciones 3.1 y 3.2, en distintas instancias.

Tabla 5.1: Instancias utilizadas de varianzas del indicador NDVI y tamaños variables

Instancias	Celdas	Hectáreas cultivadas [ha]	Varianza total
1	80	3,2	0,7292
2	100	4	0,6833
3	120	4,8	0,7120
4	140	5,6	0,8498
5	160	6,4	0,8855
6	180	7,2	0,9185
7	200	8	1,1202
8	220	8,8	1,1662
9	240	9,6	1,3239
10	260	10,4	1,4273

Nota. Los valores de la varianza presentes en los campos corresponden a las del índice NDVI medido en cada punto muestral presente en cada celda del campo. Fuente: Elaboración propia

Estos resultados toman en cuenta lo planteado en el capítulo 4. Su análisis se divide en tres secciones, en primer lugar se realiza un análisis de la resolución del modelo jerárquico, luego el análisis de resultados del modelo integrado, por último, se realiza un análisis comparativo conjunto. Se presenta en la tabla 5.1 que cada instancia posee una mayor cantidad de celdas, tamaño de cultivo y variabilidad del indicador NDVI lo cual varía los parámetros de demanda, producción, vida útil en las zonas, costos de viaje, tiempos de viaje y ventana de cosecha relacionados a estos indicadores.

Para la resolución de los modelos se utilizó el Solver GUROBI 9.5.0 en un computador con procesador AMD Ryzen Threadripper 3960X 24-Core de 3.90 GHZ y 64 GB de RAM.

5.1. Análisis Modelo Jerárquico

Se resolvió el modelo de zonificación para cada instancia, luego se utilizaron estas zonas definidas y los parámetros de estas para la resolución posterior del modelo de cosecha.

Tabla 5.2: Resultados modelo de zonificación para cada instancia

Instancia	Celdas	Zonas de manejo potenciales	Tiempo [s]	Zonas escogidas	Costo de zonificación [CLP\$]
1	80	1980	1,95312	20	\$ 11.988.400
2	100	3025	0,46875	24	\$ 14.422.200
3	120	4290	4,71875	26	\$ 15.729.600
4	140	5775	0,20313	25	\$ 15.347.400
5	160	7480	3,67188	24	\$ 14.965.100
6	180	9405	1,73438	12	\$ 8.387.230
7	200	11550	11,4375	14	\$ 9.694.630
8	220	13915	11,4062	13	\$ 9.312.340
9	240	16500	10,1719	13	\$ 9.493.280
10	260	19305	1,73438	12	\$ 9.110.990

Nota. Los tiempos corresponden a los tiempos de resolución obtenidos del solver GUROBI 9.5.0 para las distintas instancias. Fuente: Elaboración propia

La tabla 5.2 presenta los resultados del problema de zonificación, se observan mayor elecciones de zonas para las instancias 1-5 las cuales requieren un mayor nivel de homogeneidad que las instancias 6-10. El tamaño del campo y la cantidad de zonas escogidas influye en los costos de zonificación.

Luego se resuelve el modelo de cosecha presente en la sección 3.1.2, en la tabla 5.3 se observan los resultados en donde aumentan las utilidades de cosecha al aumentar el tamaño de las instancias, subdividiendo estas en sus primeras cinco instancias y las últimas de estas.

Tabla 5.3: Resultados modelo de cosecha para cada instancia

Instancia	Celdas	Tiempo [s]	Utilidad de cosecha [CLP\$]
1	80	0,0313	\$ 151.249.000
2	100	0,0781	\$ 187.858.000
3	120	0,0781	\$ 224.408.000
4	140	0,0781	\$ 261.640.000
5	160	0,0781	\$ 298.178.000
6	180	0,0781	\$ 277.723.000
7	200	0,0313	\$ 350.698.000
8	220	0,0313	\$ 384.861.000
9	240	0,0313	\$ 418.438.000
10	260	0,0625	\$ 450.781.000

Nota. Los tiempos corresponden a los tiempos de resolución obtenidos del solver GUROBI 9.5.0, las utilidades de cosecha no poseen el costo de zonificación añadido. Fuente: Elaboración propia

5.2. Análisis Modelo Integrado

Se resuelve el modelo integrado para cada instancia, se presentan los resultados en la tabla 5.4 en donde se escogen una mayor cantidad de zonas en las instancias que presentan un mayor nivel de homogeneidad requerido. En cuanto a las utilidades del modelo estos aumentan a medida que aumenta el tamaño de las instancias.

Tabla 5.4: Resultados modelo integrado para cada instancia

Instancia	Celdas	Zonas de manejo potenciales	Zonas escogidas	Utilidad Modelo Integrado [CLP\$]	Tiempo [s]
1	80	1980	20	\$ 139.949.000	31,33
2	100	3025	26	\$ 173.604.000	485,30
3	120	4290	27	\$ 209.491.000	400,80
4	140	5775	26	\$ 246.418.000	265,14
5	160	7480	25	\$ 283.340.000	2861,52
6	180	9405	23	\$ 293.899.000	3130,25
7	200	11550	15	\$ 352.256.000	251,88
8	220	13915	16	\$ 387.372.000	1431,00
9	240	16500	15	\$ 422.203.000	1290,42
10	260	19305	15	\$ 457.153.000	1819,34

Nota. Las utilidades del modelo integrado incluyen las utilidades y costos del modelo de cosecha, conjunto a los costos del modelo de zonificación; los tiempos corresponden a los tiempos de resolución obtenidos del solver GUROBI 9.5.0. Fuente: Elaboración propia

5.3. Análisis Comparativo

Se realiza un análisis comparativo entre los modelos integrado y jerárquico resueltos con los parámetros descritos en la sección 4.

Tabla 5.5: Comparación de elección de zonas modelo jerárquico e integrado

Instancia	Zonas escogidas	Zonas escogidas	Homogeneidad alcanzada	Homogeneidad alcanzada
	Modelo Integrado	Modelo Jerárquico	Modelo Jerárquico	Modelo Integrado
1	20	20	0,90542	0.90232
2	26	24	0,90070	0.90136
3	27	26	0,90130	0,90010
4	26	25	0,90000	0,90046
5	25	24	0,90150	0,90148
6	23	12	0,80225	0,80054
7	15	14	0,80173	0,80136
8	16	13	0,80783	0,80070
9	15	13	0,80268	0,80045
10	15	12	0,80014	0,80094

Nota. Los niveles de homogeneidad son los obtenidos por los modelos dada la ecuación observada en A.1 93. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.5 se observa la comparación de la elección de zonas de los modelos, en donde

el número de zonas escogidas por el modelo integrado es mayor, advirtiendo la mayor diferencia de estas en la instancia número 6 la cual posee la menor varianza total de la subdivisión instancias 6 a 10 analizadas. Los modelos jerárquicos presentan una mayor homogeneidad alcanzada, es decir una menor dispersión de su índice NDVI con respecto a su media en las zonas escogidas, en cambio la homogeneidad alcanzada por el modelo integrado se aproxima al nivel mínimo requerido. Destacan las instancia 2,4 y 10 en donde la homogeneidad alcanzada por el modelo integrado es mayor a la del modelo jerárquico, en las primeras dos mencionadas el modelo integrado escoge zonas cuya ventana de cosecha es más dispersa; en cambio en la instancia 10 la ventana de cosecha se concentra en los últimos periodos para satisfacer las demandas y utilizar menos recursos de inventario.

Tabla 5.6: Comparación resultado utilidades modelo jerárquico e integrado

Instancia	Utilidades Modelo Integrado [CLP\$]	Utilidades Modelo Jerárquico [CLP\$]	% de Aumento Utilidades
1	\$ 139.949.000	\$ 139.260.600	0,49433 %
2	\$ 173.604.000	\$ 173.435.800	0,09698 %
3	\$ 209.491.000	\$ 208.678.400	0,38940 %
4	\$ 246.418.000	\$ 246.292.600	0,05092 %
5	\$ 283.340.000	\$ 283.212.900	0,04488 %
6	\$ 293.899.000	\$ 269.335.770	9,11993 %
7	\$ 352.257.000	\$ 341.003.370	3,30015 %
8	\$ 387.372.000	\$ 375.548.660	3,14828 %
9	\$ 422.203.000	\$ 408.944.720	3,24207 %
10	\$ 457.153.000	\$ 441.670.010	3,50556 %

Nota. El porcentaje de aumento de utilidades corresponde al aumento de estas en el modelo integrado en comparación con los valores obtenidos por el modelo jerárquico.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.6 se identifica en la segunda columna las utilidades del modelo integrado, que consta de las utilidades del modelo de cosecha menos los costos de zonificación. Por último se observa el porcentaje de aumento de las utilidades en el modelo integrado en comparación a las obtenidas en el modelo jerárquico. Se observan mayores utilidades en el

modelo integrado en todas las instancias planteadas. Se destaca la instancia 6 en la cual el mejor manejo de la poca variabilidad en las zonas presentes presenta una mejor gestión de costos y satisfacción de demanda.

Tabla 5.7: Comparación demanda satisfecha e insatisfecha en los modelos jerárquico e integrado

Instancia	Demanda Satisfecha Modelo Integrado [CLP\$]	Demanda Satisfecha Modelo Jerárquico [CLP\$]	Demanda Insatisfecha Modelo Integrado [CLP\$]	Demanda Insatisfecha Modelo Jerárquico [CLP\$]
1	\$ 210.812.000	\$ 210.812.000	\$ -	\$ -
2	\$ 263.501.000	\$ 263.501.000	\$ -	\$ -
3	\$ 316.147.000	\$ 316.147.000	\$ -	\$ -
4	\$ 368.747.000	\$ 368.747.000	\$ -	\$ -
5	\$ 421.357.000	\$ 421.357.000	\$ -	\$ -
6	\$ 473.972.000	\$ 466.559.000	\$ -	\$ 7.634.930
7	\$ 526.574.000	\$ 520.784.000	\$ -	\$ 5.962.870
8	\$ 579.179.000	\$ 572.810.000	\$ -	\$ 6.558.540
9	\$ 631.732.000	\$ 624.785.000	\$ -	\$ 7.153.650
10	\$ 684.277.000	\$ 676.753.000	\$ -	\$ 7.748.770

Nota. Las demandas requeridas van en aumento al aumentar el tamaño del campo a lo largo de las instancias, dada la posibilidad de abordar mayores volúmenes en el mercado.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la satisfacción de demandas observada en la tabla 5.7, esta presenta la existencia de demanda insatisfecha en la segunda subdivisión de instancias de 6 a 10. La demanda insatisfecha presenta una tendencia de aumento, destacando la instancia 6 la cual posee su mayor valor debido a que tiene una menor varianza total, presentando zonas con atributos similares por lo que hay un menor nivel de satisfacción dada la variabilidad requerida por las demandas.

Tabla 5.8: Comparación porcentajes de aumento de costos del modelo integrado ante el modelo jerárquico para cada instancia

% Aumento de costos							
Instancias	Procesamiento	Costos de Viajes	Salario Trabajadores	Inventarios	Desechos en Cultivo	Zonificación	Costos totales
1	1,926 %	8,647 %	0,000 %	0,000 %	0,001 %	0,000 %	0,971 %
2	2,916 %	12,975 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	-7,245 %	0,187 %
3	2,568 %	10,486 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	-3,457 %	0,762 %
4	1,095 %	10,095 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	-3,540 %	0,102 %
5	0,954 %	9,403 %	0,000 %	0,013 %	0,000 %	-3,627 %	0,092 %
6	1,811 %	-0,521 %	5,648 %	21,767 %	10,325 %	-42,485 %	5,284 %
7	0,004 %	0,991 %	-0,776 %	-1,117 %	7,508 %	-5,491 %	-0,287 %
8	0,491 %	4,132 %	-0,788 %	-0,402 %	7,509 %	-15,358 %	-0,473 %
9	-0,374 %	3,626 %	-4,123 %	4,355 %	7,508 %	-10,607 %	-0,402 %
10	-0,518 %	2,612 %	-10,390 %	15,768 %	7,508 %	-15,644 %	0,092 %

Nota. El porcentaje de aumento de costos corresponde al aumento de estos en el modelo jerárquico en comparación con los valores obtenidos por el modelo integrado. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5.8 se observa el porcentaje de aumento de costos observado en el modelo jerárquico en comparación con los costos presentes en el modelo integrado en las distintas instancias. La comparación numérica de estos costos se encuentran detallados en anexos A.4.

El porcentaje de aumento de costos de procesamiento en las instancias va en disminución de su tasa de aumento, esto debido a la demanda creciente entre las instancias y sus necesidades de suplir esta. El mayor aumento de este costo se presenta en la segunda y tercera instancia esto debido a la menor variabilidad entre las zonas, lo que obliga a un mayor procesamiento para satisfacer la demanda requerida que posee una mayor vida útil; conjunto a un aumento de la demanda requerida. Se destaca que la mejor elección de zonas provee una mejor planeación de los productos requeridos a procesar.

En cuanto a los costos de viaje se observa un aumento de estos para la mayoría de las instancias presentadas, exceptuando la instancia 6 dado que el modelo integrado busca suplir toda la demanda que el modelo jerárquico decide no satisfacer, lo que implica una extensión en los usos de recursos asociados a la cosecha.

Un caso a destacar es el del salario de los trabajadores, para las instancias 1 a la 5 la decisión de los trabajadores son similares en su valor total. En cambio, las instancias 7 a 10 presentan una reducción de costos en el modelo jerárquico en comparación con el integrado, esto debido a la incidencia de la demanda no satisfecha en el modelo jerárquico que lleva a la necesidad de menor mano de obra. La instancia 6 es un caso excepcional dado que es el mayor aumento de costos en el modelo jerárquico, en este último se concentra la cosecha en los periodos 17 y 21, por lo que necesita una mayor cantidad de trabajadores. Una mejor distribución de los trabajadores a lo largo del horizonte de planificación es alcanzada por el modelo integrado.

Se observa que las tasas del aumento de costos de inventarios dependen de las ventanas de cosecha de las zonas seleccionadas y la planificación de cosecha para la satisfacción de demanda al final del periodo. Estos costos presentan mayor variación en las instancias 6-10 debido al aumento en el horizonte de planificación a 21 días, lo que implica una extensión en el uso de este recurso.

En los desechos en cultivo se observa una reducción de costos de un 0% a 0,001% para las instancias 1 a 5. En las instancias 6 a 10 se observa un aumento en la tasa de costos debido a en el modelo jerárquico no se satisface la totalidad de demanda y el modelo elige no cosechar esta cantidad de productos.

En el modelo integrado se observa un mayor costo de zonificación debido a la mayor elección de zonas para la satisfacción de demanda total que se presenta en este enfoque; en cuanto a las primeras cinco instancias la utilización de una mayor cantidad de zonas provee una disminución en los otros costos antes mencionados.

Por último, se presenta el aumento de costos totales en ambos enfoques, los cuales en su

mayoría presentan una mejor distribución de estos en el modelo integrado. Las instancias 7 a 9 presentan la particularidad de poseer una mejor distribución de costos con el modelo jerárquico, esto debido a un mayor uso de recursos en la cosecha de la mayor cantidad de zonas elegidas. Lo expuesto se diferencia en las instancias 6 y 10, en donde se observan mayores costos totales en el modelo jerárquico que en el integrado dado a un mejor manejo de inventario y procesamiento de los productos que contrarrestan los otros costos asociados.

Tabla 5.9: Número de restricciones, variables y tiempos de los enfoques jerárquico e integrado.

Instancia	Restricciones	Restricciones	Variables	Variables	Tiempo	Tiempo
	Enfoque Integrado	Enfoque Jerárquico	Enfoque Integrado	Enfoque Jerárquico	Enfoque Integrado [s]	Enfoque Jerárquico [s]
1	1.290.500	15.155	2.324.380	31.184	32,33	1,98437
2	1.970.450	17.800	3.548.080	36.909	485,30	0,54687
3	2.776.310	19.080	5.029.390	40.514	400,80	4,79687
4	3.757.270	18.492	6.768.330	40.829	265,14	0,28125
5	4.890.460	17.866	8.764.880	41.364	2861,52	3,75000
6	1.1808.400	16.730	22.016.500	42.335	3130,25	1,81250
7	14.305.600	20.252	27.035.800	51.586	251,88	11,46875
8	17.252.600	18.465	32.569.900	50.311	1431,00	11,43745
9	20.479.800	18.519	38.618.800	52.896	1290,42	10,20315
10	23.988.700	17.392	45.182.500	53.532	1819,34	1,79688

Nota. Restricciones, variables y tiempo de resolución del enfoque jerárquico corresponde a la sumatoria de estas en los modelos de zonificación y de cosecha, los cuales fueron obtenidos de resolución del solver GUROBI 9.5.0. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la tabla 5.9 se presenta la cantidad de restricciones y variables que van en aumento a lo largo de las instancias, debido al aumento de celdas y zonas potenciales; se destaca la mayor cantidad de estas en el enfoque integrado. En cuanto a los tiempos de resolución no poseen una relación lineal con el aumento en las restricciones y variables; resalta un aumento en los tiempos de resolución para el modelo integrado en comparación al modelo jerárquico, un ejemplo es lo observado en la instancia 6 en donde el modelo integrado alcanza un tiempo de resolución de 3130,25 [s] y en el modelo jerárquico posee un tiempo de resolución de tan solo 1,81[s].

6. Conclusiones

En este trabajo se proponen dos enfoques uno jerárquico y otro integrado. El primero descompone el problema en dos modelos de optimización determinista uno de delimitación de zonas y otro de programación de cosecha. El segundo enfoque es un modelo determinista que simultáneamente determina la zonas de manejo y la programación de cosecha de las zonas escogidas.

Estos modelos presentan como atributos horizonte de planificación, ventana de cosecha, limitación de recursos, calidad de producto procesado, control de inventarios, volumen de productos cosechados, desechos y limitaciones de transporte. Entre sus restricciones se encuentran las del nivel de homogeneidad requerido del índice NDVI en las zonas escogidas, decaimiento de vida útil, capacidad de procesamiento de productos, rendimiento de diferentes tipos de trabajadores, contratación y despido de estos, inventarios y límites de capacidad de almacenamiento de distintos tipos de productos, costos y tiempos de transporte de los productos, satisfacción de demanda tanto nacional como internacional con distintos requerimientos de vida útil; por último, se consideran los desechos producidos tanto en los inventarios como en las zonas de cultivo.

En la sección 5 se resuelven los modelos con ambos enfoques, según la cadena agroalimentaria presente en la sección 3 y los datos expuestos en la sección 4.

En los resultados obtenidos se observan mayores utilidades en el enfoque integrado en comparación al enfoque jerárquico, las instancias en las que se requería una mayor homogeneidad la satisfacción de demanda es de igual nivel entre ambos modelos; al contrario, las instancias con un menor nivel de homogeneidad requerida presenta una mayor demanda

insatisfecha. Se destaca la incidencia de la varianza del campo en la satisfacción de demandas dada la variabilidad requerida por estas, que debe ser suplida con mayor cantidad de productos procesados.

En cuanto a los costos se presentan un mejor manejo de costos del modelo integrado en la mayoría de las instancias, exceptuando las instancias 7,8 y 9; esto debido al aumento de los costos de zonificación y extracción para satisfacer la demanda, conjunto a la menor diferencia de los costos de inventario y procesamiento entre los modelos.

Una de las perspectivas interesantes a trabajar a futuro corresponderían a la optimización estocástica de estos modelos. Tomar en cuenta tópicos como los estándares de calidad en la selección ocurrida en las empresas de packing, el rechazo de productos en los puntos fiscalizadores para la satisfacción de la demanda internacional, los retrasos ocasionados por la falta de busques debido a altas demandas y retrasos en los viajes ocasionados por instancias como el COVID-19; podrían crear un mayor acercamiento de estos modelos a las situaciones reales de productores frutícolas.

Referencias

- Ahumada, O. & Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>
- Ahumada, O. & Villalobos, J. R. (2011). Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products. *International Journal of Production Economics*, 133(2), 677-687. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.05.015>
- Albornoz, V. M., Araneda, L. C. & Ortega, R. (2021). Planning and scheduling of selective harvest with management zones delineation. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04112-1>
- Albornoz, V. M. & Nanco, L. J. (s.f.). An Empirical Design of a Column Generation Algorithm Applied to a Management Zone Delineation Problem. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 682, 201-208. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20430-7>
- Albornoz, V. M., Nanco, L. J. & Sáez, J. L. (2019). Delineating robust rectangular management zones based on column generation algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 161 (February), 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.045>
- Albornoz, V. M. & Zamora, G. E. (2021). Decomposition-based heuristic for the zoning and crop planning problem with adjacency constraints. *TOP*, 29(1), 248-265. <https://doi.org/10.1007/s11750-020-00580-z>
- Aleman, M., Cuenca, L., Boza, A., Fuertes-Miquel, V. S., Research Centre on Production Management and Engineering (CIGIP) & Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente Universitat Politècnica de Valencia. (2019). Conceptual Framework for the Crop Planning Problem by Mathematical Programming Models under Uncertainty: An Integrative Approach.
- Aliano Filho, A., Melo, T. & Pato, M. V. (2021). A bi-objective mathematical model for integrated planning of sugarcane harvesting and transport operations. *Computers and Operations Research*, 134, 105419. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105419>
- Ampatzidis, Y. G., Vougioukas, S. G., Whiting, M. D. & Zhang, Q. (2014). Applying the machine repair model to improve efficiency of harvesting fruit. *Biosystems Engineering*, 120, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.011>
- Apaiah, R. K. & Hendrix, E. M. (2005). Design of a supply chain network for pea-based novel protein foods. *Journal of Food Engineering*, 70(3), 383-391. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.02.043>
- Arancibia Estay, G. A. & Córdova Arellano, A. E. (2018). *Análisis Costo y Calidad de Servicio Producto Hortofrutícula Uva de Mesa* (Tesis doctoral). Universidad Andrés Bello. Viña del Mar. https://repositorio.unab.cl/xmlui/bitstream/handle/ria/10804/a127636_Arancibia_G_Analisis_costo_calidad_de_servicio_2018_Tesis.pdf?sequence=1
- Avanzini, E. L., Mac Cawley, A. F., Vera, J. R. & Maturana, S. (2021). Comparing an expected value with a multistage stochastic optimization approach for the case of wine grape harvesting operations with quality degradation. *International Transactions in Operational Research*, 0, 1-31. <https://doi.org/10.1111/itor.12982>
- Babu Perumal, A., Huang, L., Nambiar, R. B., He, Y., Li, X. & Selvam Sellamuthu, P. (2021). Application of essential oils in packaging films for the preservation of fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry*, 375 (December 2021), 131810. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131810>
- Banco Central de Chile. (s.f.). Comercio Exterior. Consultado el 25 de abril de 2022, desde <https://www.bcentral.cl/web/banco-central/areas/estadisticas/comercio-exterior-de-bienes>

- Baris Tan Nihan Condem. (s.f.). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.02.005>
- Batool, R., Kazmi, S. A. R., Khurshid, S., Saeed, M., Ali, S., Adnan, A., Altaf, F., Hameed, A., Batool, F. & Fatima, N. (2022). Postharvest shelf life enhancement of peach fruit treated with glucose oxidase immobilized on ZnO nanoparticles. *Food Chemistry*, 366(February 2021), 130591. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130591>
- Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., Olsen, T. L. & Zhang, A. (2018). Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models. *Omega (United Kingdom)*, 79, 21-42. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.005>
- Bohle, C., Maturana, S. & Vera, J. (2010). A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.12.003>
- Chopra, S. & Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation* (Vol. 51). <https://doi.org/10.2298/eka0670067a>
- Cid-García NM, Alborno V, R.-S. Y. y. O. R. (2013). Rectangular shape management zone delineation using integer linear programming. *Computers and electronics in agriculture* 93:1-9.
- Codron, J. M. & Lizarraga, P. (2020). Contratos de exportacion de fruta chilena: consignacion y venta en firme. <https://hal.inrae.fr/hal-02623205>
- Contardo, C. (2013). *Análisis Comparativo de Distintas Estrategias de Comercialización de Uva de Mesa (vitis vinífera) de Exportación (Estudio de Caso)* (Tesis doctoral). UNIVERSIDAD DE CHILE. Santiago de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151162/Analisis-comparativo-de-distintas-estrategias-de-comercializacion-de-uva-de-mesa-%28Vitis-vinifera%29-de-exportaci%00c3%b3n-estudio-de-caso.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Daniel Leiva. (s.f.). Definición de orden de cosecha en base a NDVI | Customer Portal - GeoAgro. Consultado el 10 de febrero de 2022, desde <https://support.geoagro.com/es/casos-de-uso/definicion-de-orden-de-cosecha-en-base-a-comparacion-de-indices-verdes-de-los-lotes/>
- Devapriya, P., Ferrell, W. & Geismar, N. (2017). Integrated production and distribution scheduling with a perishable product. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 906-916. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.019>
- Dora, M., Biswas, S., Choudhary, S., Nayak, R. & Irani, Z. (2021). A system-wide interdisciplinary conceptual framework for food loss and waste mitigation strategies in the supply chain. *Industrial Marketing Management*, 93(May 2019), 492-508. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.10.013>
- Escallón-Barrios, M., Castillo-Gomez, D., Leal, J., Montenegro, C. & Medaglia, A. L. (2020). *Improving harvesting operations in an oil palm plantation*. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03686-6>
- Esteso, A., Alemany, M. M. & Ortiz, Á. (2021). Impact of product perishability on agri-food supply chains design. *Applied Mathematical Modelling*, 96, 20-38. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.02.027>
- Fellows, P. *Food Processing Technology: Principles and Practice* (second ed.). En: second ed. Cambridge, UK: Wood head Publishing, Cambridge, UK, 2000, p. 610.
- Ferrer, J. C., Mac Cawley, A., Maturana, S., Toloza, S. & Vera, J. (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations. *International Journal of Production Economics*, 112(2), 985-999. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.05.020>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). Agrifood chains. <http://www.fao.org/energy/agrifood-chains/en/>

- Gao, P., Zhu, Z. & Zhang, P. (2013). Effects of chitosan-glucose complex coating on postharvest quality and shelf life of table grapes. *Carbohydrate Polymers*, 95(1), 371-378. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.029>
- Gemtos, T., Fountas, S., Tagarakis, A. & Liakos, V. (2013). Precision Agriculture Application in Fruit Crops: Experience in Handpicked Fruits. *Procedia Technology*, 8(Haicta), 324-332. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.043>
- Gewinner, J., Harnisch, R., Mück, O. , et al. (1996). Manual of the prevention of post-harvest grain losses. *Manual of the prevention of post-harvest grain losses*.
- Gilani, H. & Sahebi, H. (2020). A multi-objective robust optimization model to design sustainable sugarcane-to-biofuel supply network: the case of study. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00639-8>
- Gómez-Lagos, J. E., González-Araya, M. C., Soto-Silva, W. E. & Rivera-Moraga, M. M. (2021). Optimizing tactical harvest planning for multiple fruit orchards using a metaheuristic modeling approach. *European Journal of Operational Research*, 290(1), 297-312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.015>
- González-Araya, M. C., Soto-Silva, W. E. & Espejo, L. G. (2015). Harvest planning in apple orchards using an optimization model.In L.M Plá-Aragónés (Ed.) Handbook of Operational Research in Agriculture and the Agri-Food Industry . *International Series in Operations Research and Management Science*, 224, Springer, New York,79-105. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2483-7_4
- Goubaa, A., Khalgui, M., Li, Z., Frey, G. & Zhou, M. C. (2020). Scheduling periodic and aperiodic tasks with time, energy harvesting and precedence constraints on multi-core systems. *Information Sciences*, 520, 86-104. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.12.034>
- Grillo, H., Alemany, M. M., Ortiz, A. & Fuertes-Miquel, V. S. (2017). Mathematical modelling of the order-promising process for fruit supply chains considering the perishability and subtypes of products. *Applied Mathematical Modelling*, 49, 255-278. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.04.037>
- Hajimirzajan, A., Vahdat, M., Sadegheih, A., Shadkam, E. & Bilali, H. E. (2021). An integrated strategic framework for large-scale crop planning: sustainable climate-smart crop planning and agri-food supply chain management. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 709-732. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.016>
- Hasanloo, M., Kargahi, M. & Jalilian, S. (2020). Dynamic harvesting- and energy-aware real-time task scheduling. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100413. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100413>
- Herrera-Cáceres, C., Pérez-Galarce, F., Álvarez-Miranda, E. & Candia-Véjar, A. (2017). Optimization of the harvest planning in the olive oil production: A case study in Chile. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.017>
- Huang, K. L., Yang, C. L. & Kuo, C. M. (2020). Plant factory crop scheduling considering volume, yield changes and multi-period harvests using Lagrangian relaxation. *Biosystems Engineering*, 200(43), 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.10.012>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2020). Día Mundial de la Agricultura: superficie sembrada de cultivos anuales en Chile se redujo 17,2% entre los años agrícolas 2017/2018 y 2019/2020. Consultado el 10 de septiembre de 2021, desde <https://www.inec.cl/prensa/2020/09/09/dia-mundial-de-la-agricultura-superficie-sembrada-de-cultivos-anuales-en-chile-se-redujo-17-2-entre-los-años-agrícolas-2017-2018-y-2019-2020#:~:text=lasConferenciasCiudadanas!-,Día%20MundialdeAgricultura%3Asuperf>

- Instituto Nacional de Estadísticas. (s.f.). Proyecciones de Población. Consultado el 23 de febrero de 2022, desde <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>
- Iwanami, H., Moriya-Tanaka, Y., Honda, C., Hanada, T. & Wada, M. (2018). A model for representing the relationships among crop load, timing of thinning, flower bud formation, and fruit weight in apples. *Scientia Horticulturae*, 242(May), 181-187. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.001>
- Janssen, L., Claus, T. & Sauer, J. (2016). Literature review of deteriorating inventory models by key topics from 2012 to 2015. *International Journal of Production Economics*, 182, 86-112. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.019>
- Jarumaneeroj, P., Oak Dusadeerungsikul, P., Chotivanich, T. & Akkerman, R. (2021). A multi-objective modeling approach to harvesting resource scheduling: Decision support for a more sustainable Thai sugar industry. *Computers Industrial Engineering*, 162, 107694. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107694>
- Jena, S. D. & Poggi, M. (2013). Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming. *European Journal of Operational Research*, 230(2), 374-384. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.04.011>
- Jonkman, J., Barbosa-Póvoa, A. P. & Bloemhof, J. M. (2019). Integrating harvesting decisions in the design of agro-food supply chains. *European Journal of Operational Research*, 276(1), 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.024>
- Junqueira, R. d. Á. R. & Morabito, R. (2019). Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, 213(January), 150-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.009>
- Kingdom Institute of Food Science y Technology (United Kingdom). (s.f.). Shelf life of foods: Guidelines for its determination and prediction. *London: Institute of Food Science Technology*.
- Kurozawa, L. E., Hubinger, M. D. & Park, K. J. (2012). Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.033>
- Kusumastuti, R. D., Donk, D. P. V. & Teunter, R. (2016). Crop-related harvesting and processing planning: A review. *International Journal of Production Economics*, 174, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.01.010>
- Lejarza, F. & Baldea, M. (2021). An efficient optimization framework for tracking multiple quality attributes in supply chains of perishable products. *European Journal of Operational Research*, (40). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.04.057>
- Li, J., Gao, X., Guo, B. & Wu, M. (2020). Production plan for perishable agricultural products with two types of harvesting. *Information Processing in Agriculture*, 7(1), 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.05.001>
- Lodree, E. J. & Uzochukwu, B. M. (2008). Production planning for a deteriorating item with stochastic demand and consumer choice. *International Journal of Production Economics*, 116(2), 219-232. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.09.010>
- Maia, L. O. A., Lago, R. A. & Qassim, R. Y. (1997). Selection of postharvest technology routes by mixed-integer linear programming. *International Journal of Production Economics*, 49(2), 85-90. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(96\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(96)00108-9)
- Mason-D'Croz, D., Bogard, J. R., Sulser, T. B., Cenacchi, N., Dunston, S., Herrero, M. & Wiebe, K. (2019). Gaps between fruit and vegetable production, demand, and recommended consumption at global and national levels: an integrated modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 3(7), e318-e329. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30095-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30095-6)

- McDaniel, A., Tonyali, B., Yucel, U. & Trinetta, V. (2019). Formulation and development of lipid nanoparticle antifungal packaging films to control postharvest disease. *Journal of Agriculture and Food Research*, 1 (October), 100013. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2019.100013>
- Md Nor, S. & Ding, P. (2020). Trends and advances in edible biopolymer coating for tropical fruit: A review. *Food Research International*, 134 (April), 109208. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109208>
- Miller, W. A., Leung, L. C., Azhar, T. M. & Sargent, S. (1997). Fuzzy production planning model for fresh tomato packing. *International Journal of Production Economics*, 53(3), 227-238. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00110-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00110-2)
- Min, H. & Zhou, G. (2002). Supply chain modeling: Past, present and future. *Computers and Industrial Engineering*, 43(1-2), 231-249. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00066-9)
- Ministerio de Agricultura Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2019). Potenciales efectos de la agricultura digital sobre el mercado laboral agropecuario. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2020/01/InformeAgriculturaDigital2019.pdf>
- Ministerio de Agricultura República Dominicana. (2020). *Manual de perecederos- Buenas prácticas para el manejo de productos a través de la cadena de frío* (inf. téc.). <https://otca.gob.do/wp-content/uploads/2020/08/Manual-de-Perecederos.pdf>
- Moon, A. Y., Noh, S., Moon, S. Y. & You, S. (2016). Feasibility study of atmospheric-pressure plasma treated air gas package for grape's shelf-life improvement. *Current Applied Physics*, 16(4), 440-445. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2016.01.007>
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. *Centro de información de recursos Naturales*, 15. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/TemaIndicesdevegetaci\`{\o}}n\%2CPedroMu{\`{\n}}ozA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mworia, E. G., Yoshikawa, T., Salikon, N., Oda, C., Asiche, W. O., Yokotani, N., Abe, D., Ushijima, K., Nakano, R. & Kubo, Y. (2012). Low-temperature-modulated fruit ripening is independent of ethylene in 'Sanuki Gold' kiwifruit. *Journal of Experimental Botany*, 63(2), 963-971. <https://doi.org/10.1093/jxb/err324>
- Ncama, K., Magwaza, L. S., Mditshwa, A. & Tesfay, S. Z. (2018). Plant-based edible coatings for managing postharvest quality of fresh horticultural produce: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 16(March), 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.03.011>
- Nematollahi, M. & Tajbakhsh, A. (2020). Past, present, and prospective themes of sustainable agricultural supply chains: A content analysis. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122201. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122201>
- Nordey, T., Davrieux, F. & Léchaudel, M. (2019). Predictions of fruit shelf life and quality after ripening: Are quality traits measured at harvest reliable indicators? *Postharvest Biology and Technology*, 153(June 2018), 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.03.011>
- ODEPA. (2012). Consumo aparente de principales alimentos en Chile. Consultado el 22 de febrero de 2022, desde <https://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/7004.pdf>
- ODEPA. (2021). Ficha de costo de la uva, Región de O'higgins 2020-2021. Consultado el 23 de febrero de 2022, desde <https://www.odepa.gob.cl/fichas-de-costos/ficha-de-costos-de-la-uva-region-de-ohiggins>
- ODEPA. (2019a). *Panorama de la agricultura Chilena (Chilean agriculture overview)*.
- ODEPA. (2019b). Pérdida y desperdicio de alimentos en el sector agrícola: avances y desafíos Febrero del 2019, 2-14.
- ODEPA. (2018). *Reflexiones y Desafíos al 2030*. https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf_2030-1.pdf

- OECD/FAO. (2020). *OECD-FAO Perspectivas Agrícolas 2020-2029*. https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/ocde-fao-perspectivas-agricolas-2020-2029_a0848ac0-es
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (s.f.-a). Bases de datos comercio exterior. Consultado el 22 de febrero de 2022, desde <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/bases-de-datos-comercio-exterior>
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (s.f.-b). Boletín diario de precios y volúmenes de frutas y hortalizas en mercados mayoristas 2020-2021. Consultado el 22 de febrero de 2022, desde <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-diario-de-precios-y-volumenes-de-frutas-en-mercados-mayoristas>
- Onggo, B. S., Panadero, J., Corlu, C. G. & Juan, A. A. (2019). Agri-food supply chains with stochastic demands: A multi-period inventory routing problem with perishable products. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 97(May), 101970. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101970>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). Frutas y verduras. <https://doi.org/10.4060/cb2395es>
- Pefaur, J. (2020). Evolución Fruticultura Chilena en los Últimos 20 años. *Odepa, Ministerio de Agricultura*.
- Peilin Li, H. Y. H., Sang Heon Lee. (2011). Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems. *Procedia Engineering*, 23, 351-366. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2514>
- Peng, C. & Vougioukas, S. G. (2020). Deterministic predictive dynamic scheduling for crop-transport co-robots acting as harvesting aids. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178(June), 105702. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105702>
- Puerto Valparaíso. (s.f.). Inicio. Consultado el 17 de marzo de 2022, desde <https://www.puertovalparaiso.cl/>
- Real Academia Española. (s.f.-a). Agricultura. Consultado el 12 de junio de 2021, desde <https://dle.rae.es/agricultura?m=form>
- Real Academia Española. (s.f.-b). Conserva. Consultado el 30 de diciembre de 2021, desde <https://dle.rae.es/conserva>
- Real Academia Española. (s.f.-c). Molienda. Consultado el 30 de diciembre de 2021, desde <https://dle.rae.es/molienda>
- Risayahadi, S. T. (2015). Scheduling Model in Strawberry Harvesting by Considering Product Decay During Storage. *Procedia Manufacturing*, 4(Iess), 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.067>
- Santos, D., Lopes da Silva, J. A. & Pintado, M. (2022). Fruit and vegetable by-products' flours as ingredients: A review on production process, health benefits and technological functionalities. *LWT*, 154(June 2021). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112707>
- Servicio Agrícola y Ganadero. (s.f.). ¿Qué es y qué hace el SAG? Consultado el 17 de marzo de 2022, desde <http://www.sag.cl/quienes-somos/que-es-y-que-hace-el-sag>
- Servicio Nacional de Aduanas. (s.f.). Rol, facultades y funciones. Consultado el 17 de marzo de 2022, desde <https://www.aduana.cl/rol-facultades-y-funciones/aduana/2009-04-14/104545.html>
- Sethanan, K. & Neungmatcha, W. (2016). Multi-objective particle swarm optimization for mechanical harvester route planning of sugarcane field operations. *European Journal of Operational Research*, 252(3), 969-984. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.043>
- Shao, Y., Wang, K., Xuan, G., Gao, C. & Hu, Z. (2021). Soluble solids content monitoring for shelf-life assessment of table grapes coated with chitosan using hyperspectral imaging. *Infrared Physics and Technology*, 115(March), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103725>

- Soto-Silva, W. E., González-Araya, M. C., Oliva-Fernández, M. A. & Plà-Aragónés, L. M. (2017). Optimizing fresh food logistics for processing: Application for a large Chilean apple supply chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.020>
- Torres, E., Rivera, S., Muenia, V., Corradini, F., Sepúlveda, P., Abarca, P., Defilippi, B., Muñoz, I., Selles Van Sch., G., Rodríguez, F., Campos, A. & Riquelme, J. (2017). Manual del cultivo de uva de mesa. *Convenio INIA-INDAP.*, 18, 152. <https://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/18ManualUvadeMesa.pdf>
- United Nations Environment Programme. (2021). *Food Waste Index Report 2021*.
- United States Department of Agriculture. (s.f.). Servicio Agrícola Exterior/Chile. Consultado el 17 de marzo de 2022, desde <http://usdachile.cl/sitio/>
- Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos & Carrera de Ingeniería en Alimentos. (2015). Aplicación de Recubrimientos Comestibles (Gelatina, Glicerol, Tween, Ácido Cítrico y Glucosa) y su Efecto en el Tiempo de Vida Útil de Fresa (Fragaria ananassa) Variedad Albión. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/15872/1/AL583.pdf>
- Valdiviezo, B., Pretell, C. & Marquez, L. (2016). Effect of gaseous ozone concentration on physico-chemical, microbiological characteristics and general appearance in red globe variety grape (*Vitis vinifera* L.) *Agroindustrial Science*, 1, 7-15. <https://doi.org/10.17268/agroind.science.2016.01.01>
- van Klompenburg, T., Kassahun, A. & Catal, C. (2020). Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177(January), 105709. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>
- Van Der Vorst, J., Tromp, S.-O. & Van Der Zee, D.-J. (2009). Simulation modelling for food supply chain redesign; Integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*, 47(23), 6611-6631. <https://doi.org/10.1080/00207540802356747>
- Villalobos, P., Manriquez, R., Acevedo, C. & Ortega, S. (2009). Alcance de la agricultura de precisión en Chile : estado del arte, ámbito de aplicación y perspectivas. *Www.Odepa.Gob.Cl*, 112.
- Volte, G., Bourreau, E., Giroudeau, R. & Naud, O. (2020). *Exact Method Approaches for the Differential Harvest Problem* (Vol. 12296 LNCS). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58942-4_32
- Wang, H., lei Zhan, S., Ng, C. T. & Cheng, T. C. (2020). Coordinating quality, time, and carbon emissions in perishable food production: A new technology integrating GERT and the Bayesian approach. *International Journal of Production Economics*, 225(September 2019), 107570. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107570>
- Widodo, K. H., Nagasawa, H., Morizawa, K. & Ota, M. (2006). A periodical flowering-harvesting model for delivering agricultural fresh products. *European Journal of Operational Research*, 170(1), 24-43. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.05.024>
- World Health Organization. (s.f.). Healthy diet. Consultado el 10 de septiembre de 2021, desde <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet>
- Zhang, Z., Song, H., Peng, Z., Luo, Q., Ming, J. & Zhao, G. (2012). Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods. *Journal of Food Engineering*, 109(3), 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.11.007>

A. Anexos

A.1. Linealización Varianza relativa

Linealización de la función de varianza relativa en donde α corresponde al nivel mínimo de varianza requerida, es decir el nivel de homogeneidad mínimo a obtener.

$$1 - \frac{\sum_{z \in Z} (n_z - 1) \sigma_z^2 / (N - Q)}{\sigma_{\text{total}}^2} = RV \quad (93)$$

$$1 - \frac{\sum_{z \in Z} (n_z - 1) \sigma_z^2 Q_z / (N - \sum_z Q_z)}{\sigma_{\text{total}}^2} \geq \alpha \quad (94)$$

$$\sum_{z \in Z} ((n_z - 1) \sigma_z^2 + (1 - \alpha) \sigma_{\text{total}}^2) Q_z \geq (1 - \alpha) \sigma_{\text{total}}^2 ns \quad (95)$$

A.2. Parámetros del Modelo

Tabla A.1: Parámetros utilizados en el caso de estudio para todas las instancias

Periodos de extensión vida útil (sa)	30
Capacidad máxima de transporte (vcmax)	3320
Productividad trabajadores permanentes (pp) [Kg/día]	750
Productividad trabajadores temporales (pt) [Kg/Día]	600
Salario trabajadores permanentes (sp)[\$/Horizonte]	\$ 300.000
Salario trabajadores temporales (st) [\$ /Día]	\$ 35.000
Costo fijo de elección de zona (cf) [\$ /Zona]	\$ 563.231
Costo de desechar productos (wc) [\$ /Kg]	\$ 1.426
Costo de no cosechar producto (wcz) [\$ /Kg]	\$ 204

Tabla A.2: Parámetros variables entre instancias según su horizonte de planificación

	14 días	21 días
Nivel de Homogeneidad requerida α	0,9	0,8
Capacidad máxima de bodega (mscmax)[Kg]	350.000	570.000
Volumen de bodega [m ³]	241.492	641.103
Costo de inventario	\$36	\$58
Trabajadores temporales (tw)	40	66
Capacidad de procesamiento (Cpmax)[Kg]	175.000	285.000

A.3. Procesamiento

Tabla A.3: Costos de procesamiento de chitosan glucosa. Fuente: [Gao , et al.\(2013\)](#) y [Universidad Técnica de Ambato , et al.\(2015\)](#)

	\$/Kg
Equipos	\$ 3
Servicios	\$ 137
Personal	\$ 97
Chitosan	\$ 0,04
Glucosa	\$ 0,20
Acido Acetico	\$ 79
Total	\$ 316

A.4. Comparación de Costos Modelos

Tabla A.4: Comparación de costos en los modelos jerárquico e integrado

Procesamiento Modelo Integrado [CLP\$]	Procesamiento Modelo Jerárquico [CLP\$]	Costo de Viajes Modelo Integrado [CLP\$]	Costo de Viajes Modelo Jerárquico [CLP\$]	Salario de Trabajadores Modelo Integrado [CLP\$]	Salario de Trabajadores Modelo Jerárquico [CLP\$]	Inventarios Modelo Integrado [CLP\$]	Inventarios Modelo Jerárquico [CLP\$]
\$ 35.605.100	\$ 36.362.000	\$ 5.220	\$ 5.290	\$ 11.100.000	\$ 11.100.000	\$ 8.530.200	\$ 8.520.200
\$ 44.354.500	\$ 45.648.000	\$ 6.104	\$ 6.896	\$ 14.100.000	\$ 14.100.000	\$ 11.457.910	\$ 11.457.910
\$ 53.531.000	\$ 54.965.800	\$ 7.820	\$ 8.640	\$ 17.170.000	\$ 17.170.000	\$ 14.339.250	\$ 14.339.250
\$ 62.780.000	\$ 63.467.900	\$ 9.312	\$ 10.252	\$ 20.400.000	\$ 20.400.000	\$ 17.028.980	\$ 17.028.980
\$ 72.032.200	\$ 72.719.400	\$ 10.848	\$ 11.968	\$ 23.435.000	\$ 23.435.000	\$ 19.926.480	\$ 19.926.480
\$ 81.971.800	\$ 83.436.100	\$ 13.820	\$ 15.746	\$ 28.855.000	\$ 28.855.000	\$ 24.681.700	\$ 24.681.700
\$ 90.534.700	\$ 90.538.600	\$ 15.340	\$ 15.402	\$ 34.160.000	\$ 34.160.000	\$ 30.497.000	\$ 30.497.000
\$ 99.097.100	\$ 99.583.400	\$ 17.036	\$ 17.740	\$ 38.060.000	\$ 38.060.000	\$ 33.893.130	\$ 33.893.130
\$ 109.027.000	\$ 108.610.000	\$ 19.384	\$ 20.094	\$ 43.960.000	\$ 43.960.000	\$ 37.282.600	\$ 37.282.600
\$ 118.267.000	\$ 117.654.000	\$ 21.592	\$ 22.156	\$ 45.860.000	\$ 45.860.000	\$ 40.671.000	\$ 40.671.000

Tabla A.5: Comparación de costos en los modelos jerárquico e integrado

Desechos en Cultivo Modelo Integrado [CLP\$]	Desechos en Cultivo Modelo Jerárquico [CLP\$]	Zonificación modelo Integrado [CLP\$]	Zonificación modelo Jerárquico [CLP\$]	Costos totales Integrado [CLP\$]	Costos totales Jerárquico [CLP\$]
\$ 3.544.170	\$ 3.544.210	\$11.988.400	\$11.988.400	\$ 70.863.310	\$ 71.551.300
\$ 4.430.060	\$ 4.430.060	\$15.548.700	\$15.548.700	\$ 89.897.274	\$ 90.065.066
\$ 5.315.260	\$ 5.315.240	\$16.292.900	\$16.292.900	\$106.656.230	\$107.468.530
\$ 6.199.520	\$ 6.199.540	\$15.910.600	\$15.910.600	\$122.328.972	\$122.453.992
\$ 7.083.980	\$ 7.084.000	\$15.528.300	\$15.528.300	\$138.016.808	\$138.144.448
\$ 7.968.590	\$ 8.791.360	\$14.582.800	\$ 8.387.230	\$180.073.710	\$189.587.838
\$ 8.852.950	\$ 9.517.660	\$10.257.900	\$ 9.694.630	\$174.317.890	\$173.817.652
\$ 9.737.270	\$10.468.400	\$11.002.000	\$ 9.312.340	\$191.806.536	\$190.898.880
\$10.620.900	\$11.418.300	\$10.619.700	\$ 9.493.280	\$209.529.504	\$208.686.784
\$11.504.300	\$12.368.100	\$10.800.700	\$ 9.110.990	\$227.124.592	\$227.334.046